

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Studium vláknově optických zesilovačů pro optické sítě

Study of Fiber Optical Amplifier for Optical Networks

2016

Bc. Jakub Kolář

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Kolář**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612T059 Mobilní technologie

Téma: Studium vláknově optických zesilovačů pro optické sítě
Study of Fiber Optical Amplifier for Optical Networks

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je otestování mechanických a teplotních vlivů na vláknově optická zesilovací vlákna s různými typy dopantů zapojená do optické sítě nacházející se v Laboratoři optických přístupových sítí. Student bude testovat mechanické vlivy v podobě ohybů a tahového namáhání zesilovacích vláken v závislosti na dosažení maximálního zesílení optického výkonu. Pro toto testování je nutné zhotovit experimentální pracoviště v Laboratoři optických přístupových sítí. Krom těchto experimentů bude student sledovat i maximální dosah optické sítě se zapojenými vláknově optickými zesilovacími vlákny. Práce vychází z požadavků praxe a je experimentální a simulační. Výsledky z reálných měření se porovnávají vůči simulovaným hodnotám zjištěným skrze softwarovou aplikaci Optiwave. Student navrhne model optické sítě a její topologii a poté tu samou topologii zapojí reálně v laboratoři a proměří.

1. Popis vláknově optických zesilovacích vláken a zesilovačů.
2. Nalezněte optimální délku zesilovacího vlákna tak, aby odpovídala maximální hodnotě zesílení.
3. Experimentálně změřte zesilovací vlastnosti optimalizovaného vlákna v závislosti na působící teplotě a nebo tlaku.
4. Simulace vlastností topologie xPON sítě se zapojeným vláknově optickým zesilovacím vláknem v softwarové aplikaci Optiwave.
5. Zhotovte experimentální pracoviště a zapojte vláknově optické zesilovací vlákno do xPON sítě.
6. Vyhodnocení simulovaných a naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- PREMARATNE, M., Agrawal, G., P. *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 284 s. ISBN 978-0521493482.
- BJARKLEV, A. *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications (The Artech House Optoelectronics Library)*, Vydání 1. Artech Print on Demand, 1993. 408 s. ISBN 978-0890066591.
- SHIMADA, S., Ishio, H. *Optical Amplifiers and their Applications*, Vydání 1. John Wiley & Sons, 1994. 288 p. ISBN 978-0471940050.
- LEE, T. P. *Current Trends in Optical Amplifiers and Their Applications (Selected Topics in Electronics and Systems)*. World Scientific Pub Co Inc, 1996. 222 s. ISBN 978-9810226954.
- DUTTA, N a Qiang WANG. *Semiconductor optical amplifiers*. Vydání 2. ISBN 978-981-4489-034.
- NEMOVA, G. *Optical Amplifiers (Physics Research and Technology)*. Nova Biomedical Books, 2011. 337 s. ISBN 978-1612098357.

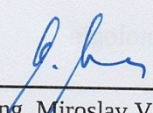
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

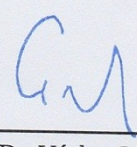
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 29.04.2016




doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi při vypracování této diplomové práce pomohli. Jmenovitě bych rád vyjádřil své poděkování především těmto lidem. Jsou to Bc. Zdeněk Wilček, Ondřej Čech, Ing. Mirek Zajonc a Mirek Hefner. Jejich odborná pomoc a jejich cenné rady byly nezbytné pro dokončení této diplomové práce.

Rád bych také poděkoval mému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Janu Látalovi za jeho metodické vedení, které bylo velmi přínosné pro vypracování této práce. Oceňuji jeho vstřícnost a profesionalitu s jakou dokázal řešit problémy a dotazy, které se v průběhu vypracování této práce vyskytly.

Avšak to největší poděkování patří mým rodičům, protože bez nich a bez jejich podpory by nebylo možné tuto diplomovou práci vůbec dokončit. Děkuji jim z celého srdce, že jsou mi po celý můj život pevnou oporou.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 8.4.2016



.....
Podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou optických vláknových zesilovačů, které jsou nasazovány v dnešních optických sítích. Konkrétně se pak tato práce zaměřuje na Erbiem dopované vláknové zesilovače. Diplomová práce je rozdělena do třech hlavních částí.

První část se zaměřuje na vysvětlení nezbytné teorie pro pochopení fungování optických zesilovačů. Jsou zde popsány principy fungování optických zesilovačů a typy optických zesilovačů. Popsány jsou zde i negativní jevy, které ovlivňují přenos signálu a také samotné zesílení v optických sítích.

V druhé části této práce je popsán samotný návrh a realizace stavby optického Erbiem dopovaného vláknového zesilovače a celého měřícího pracoviště. Je zde detailněji popsán postup hledání ideální délky Erbiem dopovaného vlákna, testování vlivu teploty na zesilovač a jeho schopnost zesílení. Dále je vliv teploty na zesílení testován při zapojení do reálné WDM-PON sítě.

Poslední část se zabývá převedením topologie reálné WDM-PON sítě do aplikace Optiwave OptiSystem 14 a následném otestování vlivu teploty na experimentální zesilovač a jeho zesílení.

KLÍČOVÁ SLOVA

EDFA, EDFA zesilovač, vliv teploty na EDFA, WDM-PON, Erbiem dopované vlákno.

ABSTRACT

This thesis deals with the issues regarding optical fiber amplifiers that are used in current optical networks. Specifically, the thesis is aimed at Erbium-doped fiber amplifiers. The thesis is divided into three main parts.

The first part is focused on explanation of the essential theory for better understanding of functioning of optical amplifiers. In this part are described the principles of functioning of optical amplifiers and the types of optical amplifiers. Undesirable effects, which have negative influence on signal transmission and amplification, are also described in this part.

The second part of the thesis is focused on description of the design and assembling of Erbium-doped fiber amplifier as well as on detailed description of complete workplace. In this part is, in more detail, described the procedure of finding of the ideal length of Erbium-doped fiber, testing of influence of temperature on optical amplifiers. Finally, Erbium-doped fiber amplifier is connected to the WDM-PON network and the influence of temperature on amplification of optical amplifiers is tested.

Last part of the thesis deals with conversion of the real WDM-PON network into the simulations in Optiwave OptiSystem 14. Subsequently, the influence of temperature on optical amplifier is tested.

KEY WORDS

EDFA, EDFA amplifier, influence of the temperature on EDFA, WDM-PON, Erbium-doped fiber

Úvod	11
1. Optické zesilovače	12
1.1. Základní principy fungování zesilovačů	12
1.1.1. Stimulovaná emise	12
1.1.1. Spontánní emise.....	13
1.2. Rozdělení zesilovačů podle umístění na trase	14
1.2.1. Výkonový zesilovač.....	14
1.2.2. Průběžný zesilovač	14
1.2.3. Předzesilovač.....	14
1.3. Rozdělení zesilovačů podle rekonstrukce signálu	15
1.3.1. Rekonstrukce signálu 1R	15
1.3.2. Rekonstrukce signálu 2R	16
1.3.3. Rekonstrukce signálu 3R	16
2. Typy optických zesilovačů	17
2.1. Erbiem dopovaný vláknový zesilovač.....	17
2.1.1. Základní popis a zapojení	17
2.1.2. Pumpovací lasery	19
2.1.3. Typy pump.....	19
2.1.4. Typy variant pumpovacích obvodů	21
2.1.5. Vzdálené pumpování.....	22
2.1.6. Absorpce pumpovaného světla.....	23
2.1.7. Dopovací vlákna	23
2.1.8. Typy dopantů	23
2.1.9. Materiál používaný pro matrice	25
2.1.10. Jiné typy používaných dopantů	26
2.1.11. Délka zesilovacího vlákna	27
2.2. Další komponenty používané v EDFA zesilovačích.....	28
2.2.1. WDM slučovač.....	28
2.2.2. Izolátor	28
2.3. Popis Ramanovských typů zesilovačů	29
2.3.1. Schéma Ramanova zesilovače.....	30
2.3.2. Průběh zesílení	30
2.3.3. Zhodnocení vlastností Ramanova zesilovače	31

3. Jevy negativně ovlivňující přenos signálu	32
3.1. Útlum.....	32
3.1.1. Ztráty absorpcí	32
3.1.2. Ztráty rozptylem.....	34
3.1.3. Ztráty vyzařováním.....	34
3.1.4. Ohybové ztráty.....	34
3.1.5. Módová disperze	35
3.1.6. Vlnovodná disperze.....	36
3.1.7. Profilová disperze.....	36
3.1.8. Materiálová disperze.....	36
3.1.9. Chromatická disperze.....	37
3.1.10. Polarizačně vidová disperze	38
3.2. Nelineární jevy	39
3.2.1. Materiálový rozptyl	39
3.2.2. Ramanův rozptyl	39
3.2.3. Brillouinův rozptyl	41
3.2.4. Čtyřlenné směšování	43
3.2.5. Vlastní fázová modulace	44
3.2.6. Křížová fázová modulace.....	44
3.2.7. Kerrův jev	45
3.3. Šumy.....	45
3.3.1. Výstřelový šum	45
3.3.2. Tepelný šum	46
3.3.3. ASE.....	46
4. Návrh a příprava měřicího pracoviště.....	48
4.1. Sestavení měřicího pracoviště	48
4.1.1. Použití systému DTS pro měření teploty uvnitř měděné kostky.....	51
4.2. Použité optické komponenty	53
4.2.1. Pumpovací (čerpací) lasery	53
4.2.2. WDM slučovač.....	55
4.2.3. Volba testovacích Erbiem dopovaných vláken.....	56
4.3. Kompletní zapojení EDFA zesilovače.....	57

5. Hledání ideální délky Erbiového vlákna vzhledem k maximálnímu zesílení	58
5.1. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-1	60
5.2. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-2	62
5.3. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-1	64
5.4. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-2	66
6. Testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě	68
6.1. Popis měřicího pracoviště a použitých komponent	68
6.2. Měření teploty pomocí systému DTS	69
6.3. Testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě	71
6.3.1. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-1	71
6.3.2. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-2	75
6.3.3. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-1	79
6.3.4. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-2	82
7. Testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě při zapojení do WDM-PON sítě	85
7.1. Popis použitých komponent v testovací síti WDM-PON	85
7.1.1. OLT jednotka EAST 1100	85
7.1.2. AWG směrová odbočnice	86
7.1.3. Přenosová trasa	86
7.1.4. Koncové jednotky EARU 1112	87
7.2. Experimentální zapojení sítě WDM-PON	88
7.3. Měření teploty pomocí systému DTS	90
7.4. Testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě při zapojení do WDM-PON sítě	92
7.4.1. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-1	92
7.4.2. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-2	96
7.4.3. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-1	100
7.4.4. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-2	104
7.5. Vzájemné porovnání výsledků hodnoty zesílení experimentálních Erbiem dopovaných vláken	108

8. Simulace vlastností topologie WDM-PON sítě se zapojením experimentálních Erbiem dopovaných vláken v aplikaci Optiwave	112
8.1. Topologie WDM-PON sítě	112
8.1.1. OLT jednotka	113
8.1.2. Přenosová trasa.....	114
8.1.3. EDFA zesilovač.....	115
8.1.4. ONU koncové jednotky	115
8.2. Testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě v simulaci WDM-PON sítě	116
8.2.1. Simulace s experimentálním vláknem SAE-1	117
8.2.2. Simulace s experimentálním vláknem SAE-2	119
8.2.3. Simulace s experimentálním vláknem SGAE-1.....	121
8.2.4. Simulace s experimentálním vláknem SGAE-2.....	123
Závěr	125
Seznam použité literatury:	127
Seznam zkratk.....	130
Seznam obrázků.....	132
Seznam tabulek	138
Seznam příloh.....	138

Úvod

V současné době můžeme pozorovat neustále se zvyšující nároky na přenosové optické sítě. Zvyšující se nároky se netýkají pouze zvyšování přenosových rychlostí, ale také nezbytné schopnosti překlenout velké vzdálenosti. Při průchodu signálu optickým vláknem dochází k jeho utlumování v důsledku působení různých vlivů. Proto je vhodné zařadit do přenosové trasy zesilovače. Existují různé druhy optických zesilovačů a jedním z nich je EDFA zesilovač. EDFA zesilovače jsou velmi často nasazovány do optických tras. Především díky jejich vlastnostem a výslednému zesílení. I v oblasti zlepšování EDFA zesilovačů dochází stále k dalšímu vývoji, hlavně pokud jde o dopovaná vlákna, která jsou v nich použita.

V rámci vypracovávání této diplomové práce byla navázána spolupráce s výzkumným centrem pro optická vlákna v Kalkatě v Indii. Přesný název tohoto výzkumného centra zní: „Fibre Optics & Photonics Division Central Glass & Ceramic Research Institute in Kolkata“. Z tohoto výzkumného centra byly zapůjčeny čtyři experimentální Erbiem dopovaná vlákna pro účely sestavení experimentálního EDFA zesilovače a pro potřeby následného testování. Jedná se o experimentální Erbiem dopovaná vlákna s označením SAE-1, SAE-2, SGAE-1 a SGAE-2.

Práce je rozdělena na několik částí. V první a druhé kapitole jsou vysvětleny teoretické aspekty fungování optických zesilovačů a jejich typů. V těchto kapitolách jsou zahrnuty základní poznatky o fungování zesilovačů. Také jsou zde uvedeny a detailněji popsány různé druhy optických zesilovačů. Třetí kapitola této práce se stále zabývá teorií a to konkrétně popisem jevů, které negativně ovlivňují přenos signálu. V této kapitole je podrobněji rozebrán vliv útlumu, nelineárních jevů a také různých šumů na samotný přenos signálu.

Ve čtvrté kapitole této diplomové práce je podrobněji popsán návrh experimentálního EDFA zesilovače a také návrh kompletního měřicího pracoviště. Je zde například popsáno, jak bylo vyřešeno sledování teploty pomocí systému DTS a také finální zapojení námi navrženého experimentálního EDFA zesilovače.

Pátá kapitola se věnuje popisu postupu hledání ideální délky experimentálních Erbiem dopovaných vláken. Je zde podrobněji popsáno, jak probíhalo samotné měření a jaké komponenty byly použity.

V šesté a sedmé kapitole je popsána stěžejní část celé této diplomové práce. Jedná se o testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken při vystavení teplotám 25°C až 90°C, při výkonech pumpy od 0 mW až do 200 mW. V šesté kapitole je experimentální EDFA zesilovač zapojen samostatně a experimentální Erbiem dopovaná vlákna jsou testována pro již zmíněné teploty a výkony pumpy.

V sedmé kapitole je provedeno podobné testování zesílení experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě a výkonech pumpy a celý experimentální EDFA zesilovač je zapojen do experimentální WDM-PON sítě v laboratoři EB316.

V poslední osmé kapitole je uveden popis vytvořené kopie reálné sítě v softwarové aplikaci Optiwave OptiSystem 14. Dále jsou experimentální Erbiem dopovaná vlákna otestována v rámci této aplikace při různých teplotách a výkonech pumpy. Výsledky ze simulací jsou zde také okomentovány a vyhodnoceny.

1. Optické zesilovače

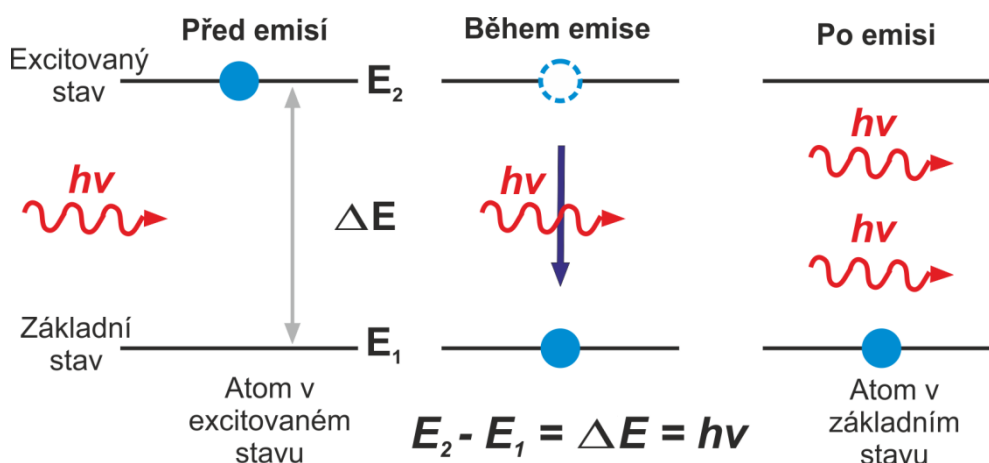
Optické zesilovače patří mezi důležité prvky v optických sítích. Díky optickým zesilovačům je možné překlenout velké vzdálenosti v rámci optické trasy. Mezi další výhody patří také možnost rekonstrukce signálu. V dalších kapitolách budou podrobně rozebrány principy fungování zesilovačů a typy jednotlivých zesilovačů, jejich umístění v síti, typy dopantů atd.

1.1. Základní principy fungování zesilovačů

V následující kapitole je nejprve nutné vysvětlit a popsat základní principy fungování zesilovačů. Tato kapitola se zaměřuje především na popsání stimulované a spontánní emise.

1.1.1. Stimulovaná emise

Stimulovaná emise představuje základní princip, který se využívá pro zesílení signálu. Pro pochopení tohoto principu je nutné znát, že elektrony se v atomu vyskytují v energetických hladinách. Čím vzdálenější jsou od jádra, tím vyšší je jejich energie. Na obrázku 1 (Obr. 1) lze vidět celý proces, který bude následně vysvětlen. Pro vysvětlení byl použit pouze dvouhladinový systém.



Obr. 1: Znáornění principu stimulované emise [2]

Kde h je Planckova konstanta ($6,33 \cdot 10^{-24} \text{J}$) a ν je frekvence záření. Základní hladina nese označení E_1 a vyšší hladina E_2 . Z toho tedy platí, že $E_2 > E_1$. V případě E_1 se soustava nachází v základním stavu a v případě E_2 se nachází ve stavu excitovaném. Setrvaní v tomto excitovaném stavu trvá pouze po omezený čas. Obvykle řádově 10^{-3} až 10^{-7} . Po této době probíhá přechod do základního stavu a dojde k vyzáření fotonu či fononu. V případě, že dojde k spontánnímu vyzáření fotonu, jedná se o spontánní emisi. Spontánní emise bude detailněji popsána v následujících kapitolách.

Naproti tomu princip stimulované emise znamená, že dopadající záření zapříčiňuje sestup elektronu, který se nachází v excitované hladině, do hladiny základní. V průběhu tohoto sestupu elektronu se vyzáří foton, který má stejnou vlnovou délku, polarizaci a fázi jako foton, který stimulovanou emisi zapříčinil.

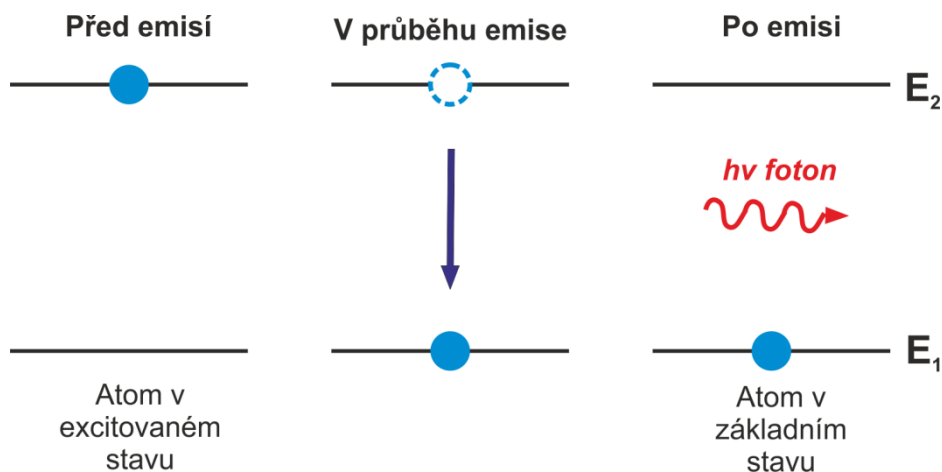
Pokud převládají přechody z hladiny E_2 do hladiny E_1 jedná se o zesilování. Pokud ovšem převládají přechody z hladiny E_1 do hladiny E_2 , je signál zeslabován vlivem absorpce.

Pro využití stimulované emise je nutné dosáhnout většího počtu elektronů v excitovaném stavu než ve stavu základním. Pokud tedy převládá počet elektronů ve stavu E_2 nad elektrony ve stavu E_1 jedná se o takzvanou inverzní populaci. V takovém případě dochází k zesílení signálu. Tohoto stavu lze dosáhnout takzvaným buzením neboli čerpáním za použití pump. Pro buzení je možné využít například světelné záření nebo elektrický výboj [1], [2].

1.1.1. Spontánní emise

Při zesilování nedochází jen k stimulované emisi, ale také k emisi spontánní. Spontánní emise je znázorněna na obrázku 2 (Obr. 2). Tato emise se dá jednoduše vysvětlit opět na příkladu dvou hladinového systému. V případě spontánní emise se jedná o přechody z energetické hladiny E_2 do energetické hladiny E_1 . Tento přechod z vyšší hladiny do nižší může být zářivý nebo nezářivý. V případě, kdy je přechod zářivý, vzniká foton náhodné polarizace, fáze a také vlnové délky. Díky tomu můžeme toto záření označit za nekoherentní. V případě nezářivého přechodu je energie absorbována krystalickou mřížkou materiálu a poté přeměněna na teplo.

U optických zesilovačů je spontánní emise velmi nevítaný jev. Především proto, že při zesilování původního signálu dochází k zesílení spontánní emise. Vlivem toho pak dochází k vytváření nežádoucího šumu. Zesílená spontánní emise se označuje jako ASE [1] [2].



Obr. 2: Znázornění principu spontánní emise [2]

1.2. Rozdělení zesilovačů podle umístění na trase

V předchozí kapitole byly vysvětleny principy zesílení signálu. V této části se zaměříme na popsání zesilovačů z hlediska topologie sítě. Z hlediska zapojení v topologii sítě je možné zesilovače rozdělit do tří kategorií. Jako výkonový zesilovač, průběžný zesilovač nebo jako předzesilovač.

1.2.1. Výkonový zesilovač

Hlavní úkol předzesilovače je zesílit signál před samotným přenosem. Toto je vhodné řešení, pokud potřebujeme překlenout velkou vzdálenost a na trase již nechceme umístit žádné aktivní prvky. Spolehlivost takovéto trasy je větší právě z důvodu nepoužití žádných aktivních prvků na trase.

Dále také musí mít výkonový zesilovač vysokou hodnotu saturačního výkonu. Saturační výkon vyjadřuje schopnost zesilovače přijmout velký vstupní výkon. Jelikož výkon signálu, který vstupuje do zesilovače je obvykle vysoký, tento parametr rozhoduje o tom, jestli je vhodné umístit daný zesilovač hned za vysílačem. Díky tomu je možné na výstupu dosáhnout vysokých výkonů a zároveň redukovat efekt saturace zisku. K tomuto efektu dochází, pokud výkon optického signálu narůstá nebo v případě, že výkon optické pumpy poklesne. V tomto případě je stav inverze populace redukován a jako následek je snížen i zisk.

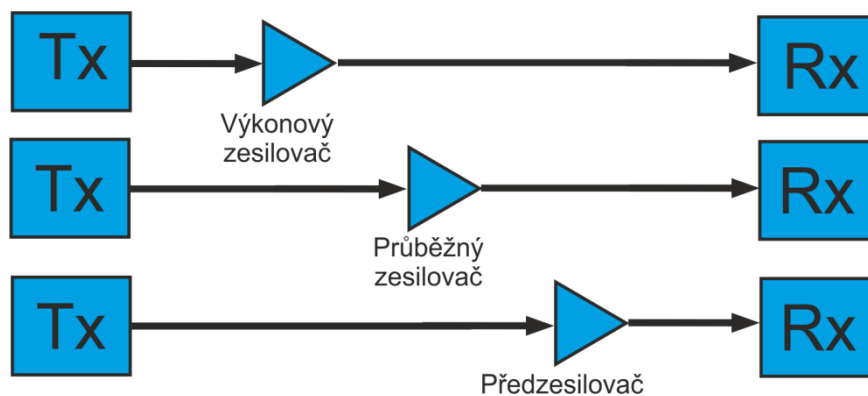
Výkonový zesilovač je nezbytný v případě, pokud je nutné zesílit několik vstupních signálů o různých vlnových délkách. Tato situace nastává například v případě WDM [3].

1.2.2. Průběžný zesilovač

Průběžný zesilovač je v optických sítích používán ke kompenzování útlumu vlastní trasy, ke kterému došlo v průběhu přenosu ve vlákne. Hlavní výhoda průběžného zesilovače je jeho nezávislost na druhu použité modulace a přenosové rychlosti. Nezbytnými vlastnostmi pro tento typ zesilovačů je velký zisk a velký saturační výkon. Nevýhodou je nutnost napájení a tedy i zdroje elektrické energie. [3].

1.2.3. Předzesilovač

Předzesilovač je v optických sítích nasazován na konci optické trasy těsně před vstupem do přijímače. Tohoto umístění se využívá z důvodu, že zvýšení úrovně signálu má za následek zvýšení výkonu dopadajícího na fotodetektor přijímače. V případě, kdy je použit předzesilovač, je možné dosáhnout zlepšení odstupu signálu od šumu. U předzesilovače jsou pak hlavními parametry velký zisk, ale především nízká hodnota šumového čísla neboli SNR, které udává poměr odstupu signálu od šumu. Na následujícím obrázku 3 (Obr. 3) je znázorněno umístění jednotlivých zesilovačů, které byly popsány výše [3].



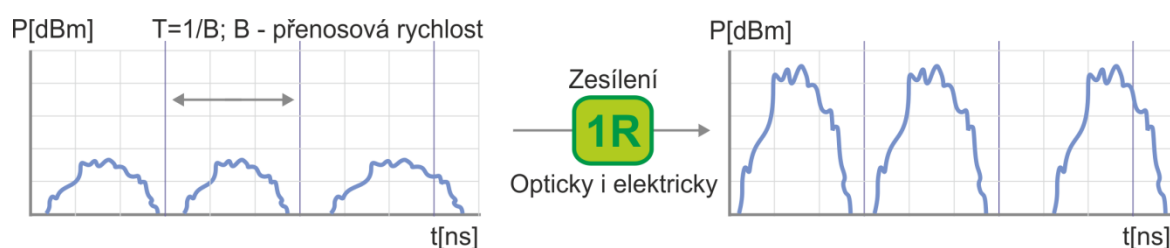
Obr. 3: Umístění zesilovačů v optické trase

1.3. Rozdělení zesilovačů podle rekonstrukce signálu

V předchozí části byly zesilovače rozděleny a popsány z hlediska jejich umístění v topologii optické sítě. Dále je možné rozdělit zesilovače podle zpracování neboli takzvané rekonstrukce signálu.

1.3.1. Rekonstrukce signálu 1R

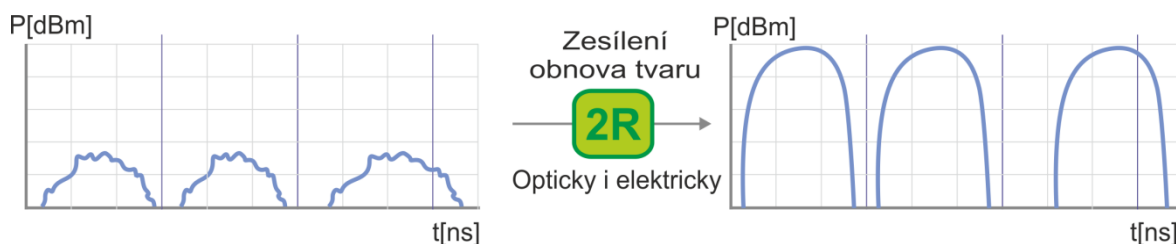
Při této rekonstrukci signálu se signál pouze zesílí. Tento způsob rekonstrukce optického signálu je velice aplikovatelný, protože nedochází ke konverzi optického signálu na elektrický a zpět. Díky tomu je zesilovač této kategorie nezávislý na kódování, přenosové rychlosti nebo jiných vlastnostech daného signálu. Na tomto principu fungují optické zesilovače a tento princip je znázorněn na obrázku 4 (Obr. 4) [4].



Obr. 4: Princip rekonstrukce signálu 1R [4]

1.3.2. Rekonstrukce signálu 2R

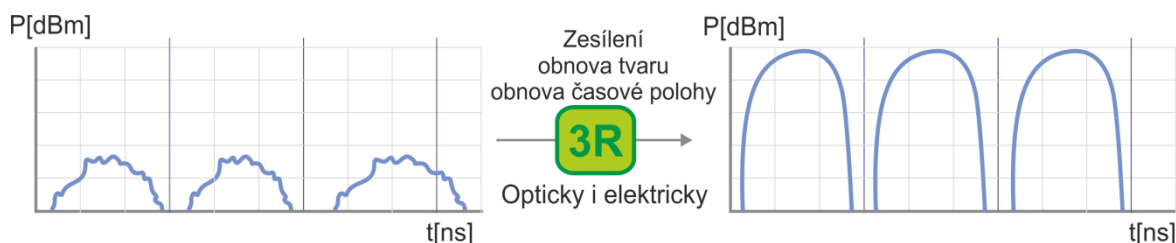
V případě rekonstrukce signálu 2R je signál nejen zesílen, ale také je upraven jeho tvar. Z důvodu upravení tvaru signálu je nutné převést optický signál na elektrický. Takto převedený signál je upraven do přibližné podoby vzhledem k původnímu vysílanému signálu. Opravený signál je následně převeden zpět na optický signál a pomocí zdroje záření poslán zpět do dané topologie. Princip je znázorněn na obrázku 5 (Obr. 5) [4].



Obr. 5: Princip rekonstrukce signálu 2R [4]

1.3.3. Rekonstrukce signálu 3R

V posledním případě rekonstrukce signálu 3R je signál nejen zesílen a je upraven jeho tvar, ale také je upraveno časování jednotlivých impulzů. V tomto případě se jedná o kompletní rekonstrukci signálu. Toto je pak znázorněno na obrázku 6 (Obr. 6) [4].



Obr. 6: Princip rekonstrukce signálu 3R [4]

2. Typy optických zesilovačů

Pokud chceme distribuovat optický signál na větší vzdálenosti, nevyhneme se použití zesilovačů. Na tom, jak kvalitní bude signál má vliv například útlum, nelinearita, ale také disperze apod. Pokud do architektury naší optické sítě zakomponujeme zesilovače, zvýší to rapidně dosah celé sítě. Kromě zesílení signálu umí zesilovače také obnovovat původní signál. Zesilovače mohou obnovit například tvar signálu nebo provést časovou opravu signálu, jak již bylo popsáno v předcházející kapitole. Zesilovače se dělí v základním rozdělení na polovodičové, mezi které patří SOA, RSOA, FP-SOA, TW-SOA zesilovače. Dále na vláknové zesilovače, mezi které patří vláknové zesilovače (nejčastěji EDFA založená na využití iontů Erbium s různou koncentrací) a Ramanovské zesilovače, které pro zesílení signálu využívají stimulovaného Ramanova rozptylu nebo jiné typy zesilovačů využívající jiné typy dopantů. Tyto typy zesilovačů budou následně více popsány.

2.1. Erbiem dopovaný vláknový zesilovač

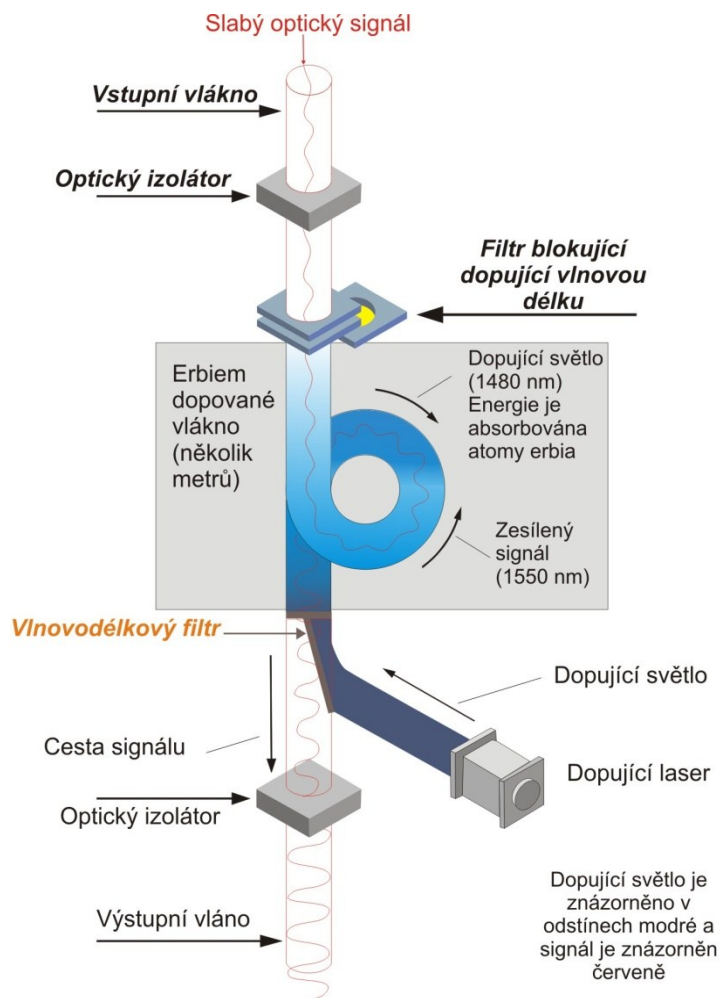
V této části bude více popsán EDFA zesilovač a následně pak další oblasti, které se zesilovačem bezprostředně souvisí. Jako například základní zapojení vláknově optických zesilovačů a jejich modifikací. Dále budou popsány pumpovací (čerpací) lasery a jejich parametry a vlastnosti, které musí splňovat. Následně budou popsána také samotná zesilovací vlákna.

2.1.1. Základní popis a zapojení

EDFA zesilovač je tvořen hlavně laserovým zdrojem záření, v tomto případě se o zdroji záření vyjadřujeme jako o laserové pumpě. Neméně důležitým prvkem těchto zesilovačů je speciální optické vlákno, které je většinou dopováno prvky vzácných zemin jako například Erbium. U jiných typů zesilovačů se mohou objevit i jiné prvky například Ytterbium nebo Thulium. Především dopované vlákno má markantní dopad na spektrální rozsah zesilovače. Při zvolení vhodných dopantů není nutné pracovat se zesilovačem jen v C a L pásmu, ale je možné pracovat například v O, E a S pásmu. Lasery používané ve vláknových zesilovačích a také zesilovací vlákna s různými dopanty budou popsána v následujících kapitolách [4].

Princip funkce zesilovačů (EDFA) je následující. Zeslabený optický signál dorazí na vstup zesilovače. Signál nejdříve prochází optickým izolátorem, který má za úkol zabránit šíření optického paprsku zpět do zdroje záření. Pokud by se tak stalo, mohlo by to způsobit jeho rozladování. Optický signál dále prochází soustavou filtrů, které mají zamezit šíření optického paprsku na vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm z pumpy. Poté se již zeslabený optický signál nachází v zesilovacím vlákně. Mezitím laserová pumpa vyzařuje světlo na vlnových délkách 980 nm nebo 1480 nm. Toto světlo je přivedeno přes WDM spojovač a dále proudí do speciálního zesilovacího vlákna o délce až několika metrů. Díky laserové pumpě dochází v tomto vlákně k excitaci atomů erbia a ty se dostávají na vyšší energetickou hladinu. Energie se uvolní vlivem přítomnosti přenášeného signálu, jehož energie zapříčiňuje emisi záření o shodné vlnové délce a shodné fázi s přenášeným signálem. Tímto principem dochází k žádanému zesílení optického signálu.

Po zesílení prochází optický signál, který je již zesílen přes další izolátor a to z toho důvodu, aby se omezilo šíření pumpovací vlnové délky. Poté je již zesílený optický signál přiveden na výstup zesilovače. Pro lepší představu o fungování EDFA zesilovačů je zde také následující obrázek 7 (Obr.7) [6], [7].



Obr. 7: Principiální schéma znázorňující fungování EDFA optického zesilovače [6]

2.1.2. Pumpovací lasery

Nezbytným prvkem v EDFA zesilovačích je pumpovací laser. Pumpovací laser zajišťuje dodání optické energie do dopovaného vlákna. Díky tomu, že tento proces velice ovlivňuje proces samotného zesilování, jsou na pumpovací lasery kladeny vysoké nároky. Z důvodu nevhodnosti rozladování vlnové délky a popřípadě i kolísání výkonu je nutné, aby byl laser vhodně teplotně stabilizován. Toto je nezbytné, protože dopovaná vlákna absorbují energii pouze na přesné vlnové délce. Přesná vlnová délka je určena v závislosti na použitém dopantu v dopovaném vlákne. Díky přesnému výrobnímu postupu a také perfektním parametrům, je toto vše ve výsledku promítnuto i v ceně pumpovacích laserů.

Dále je třeba zmínit vlnové délky, na kterých pumpovací lasery pracují. Vlnová délka je odvozena od dopantů, které jsou použity. Pro nejvíce používaný dopant, kterým je Erbium, jsou používány vlnové délky 980 nm a 1480 nm. Tyto vlnové délky na kterých pracují pumpovací (čerpací) lasery a jejich vlastností, budou uvedeny v následující kapitole.

2.1.3. Typy pump

Jak již bylo v předešlé kapitole zmíněno, pro Erbiem dopované zesilovače se používají nejčastěji vlnové délky 980 nm a 1480 nm.

Čerpací zdroj s vlnovou délkou 980 nm se nejprve na začátku používání vláknových zesilovačů moc nevyužíval. Bylo to zapříčiněno z důvodu spolehlivosti daného typu čerpacího laseru. V porovnání s pumpovacím (čerpacím) zdrojem na vlnové délce 1480 nm docházelo u tohoto zdroje k častějším poruchám a byl náchylnější na optické poškození. Později se však podařilo vyvinout pumpovací (čerpací) pumpy, které měli daleko vyšší spolehlivost a byly následně nasazovány na pozemní, ale také na podmořské optické trasy. Tento čerpací zdroj má vyšší oblast útlumu a je ho vhodné použít tam, kde je nutné dosáhnout nižšího šumu. Útlumové pásmo u tohoto zdroje je relativně úzké a proto je nutné použít laserový zdroj se stabilizátorem vlnových délek. Mezi jednu z hlavních předností patří skutečnost, že při jeho nasazení můžeme dosáhnout menšího šumu. V současnosti se preferuje nasazení právě tohoto čerpacího zdroje na vlnové délce 980 nm. Pro stejný výkon je v případě laserové pumpy v pásmu 980 nm k dispozici o 50% méně fotonů než v případě 1480 nm pumpy. S rostoucím stupněm populační inverze rovněž klesá šum zesilovače.

Čerpací zdroj s vlnovou délkou 1480 nm se vyznačuje především spolehlivostí a také nižší cenou. Z důvodu těchto vlastností je tento čerpací zdroj nasazován v pozemních a také v podmořských trasách. Jako hlavní nedostatek je třeba uvést jeho rychlejší opotřebování a tím pádem i rozladování centrální vlnové délky a postupné ztrácení výkonu. Toto může být do jisté míry kompenzováno tak, aby opotřebení pumpy v závislosti na výkonu bylo správně nastaveno. V takovém případě je pak možné dosáhnout vyhovujícího výkonu při dostačujícím stupni spolehlivosti. Tento laser má nižší, ale za to širší oblast útlumu a obvykle se používá tam, kde je nutné nasadit velice výkonné zesilovače. Nevýhodou může být fakt, že zesilovače buzené těmito zdroji dosahují horších šumových parametrů. Při přeměně pumpovacího (čerpacího) výkonu na zesílený signál však dosahují větší účinnosti [8].

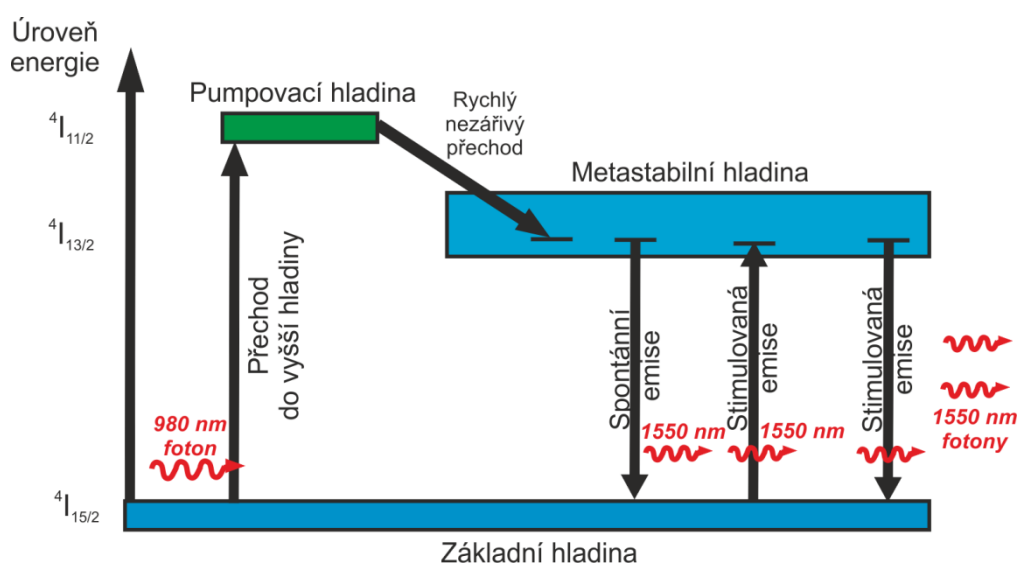
Jako další je v tabulce 1 (Tab.1) uveden přehled parametrů pro oba typy dopovacích pump.

Parametr	980-nm laser	1480-nm laser
Minimální útlum	<4dB	<5,5dB
Výkon	300 mW (standard)	250 mW (standard)
	>500 mW (vysoký výkon)	310mW
Spektrální šířka	5 nm @250 mW	8 nm @ 250 mW

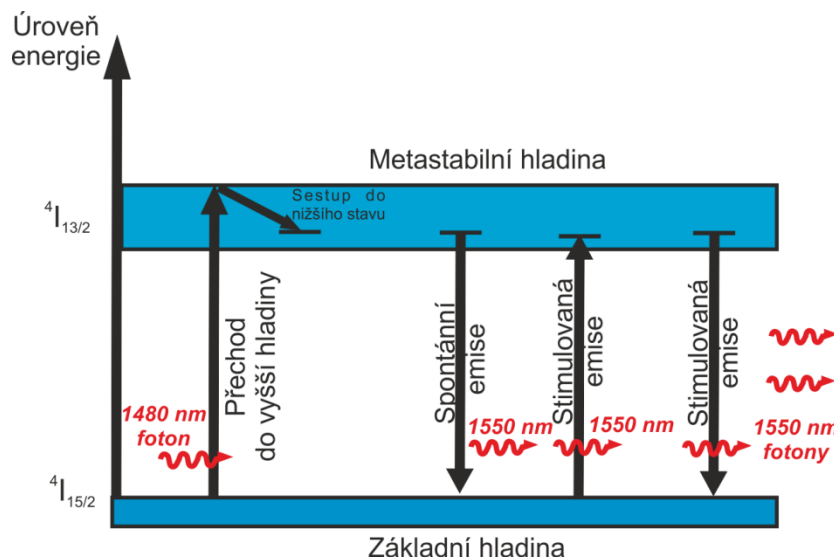
Tab. 1: Porovnání pump na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm [9]

První je v tabulce 1 (Tab. 1) definována hodnota ASE šumu. Tento ASE šum velmi ovlivňuje výsledné parametry EDFA zesilovačů. Z tohoto důvodu je použití jiné vlnové délky opodstatněné. Další neméně důležitý parametr je možnost využít větší výkon při použití pumpovacího laseru na vlnové délce 980 nm [9].

Jako další rozdíl lze uvést, že při použití pumpovacího laseru na vlnové délce 980 nm jsou elektrony excitovány do vyšší energetické úrovně než při použití pumpovacího laseru na vlnové délce 1480 nm. Na obrázcích 8 a 9 (Obr. 8), (Obr. 9) níže jsou znázorněny energetické stavy elektronů při použití pumpovacího laseru na vlnové délce 980 nm nebo 1480.



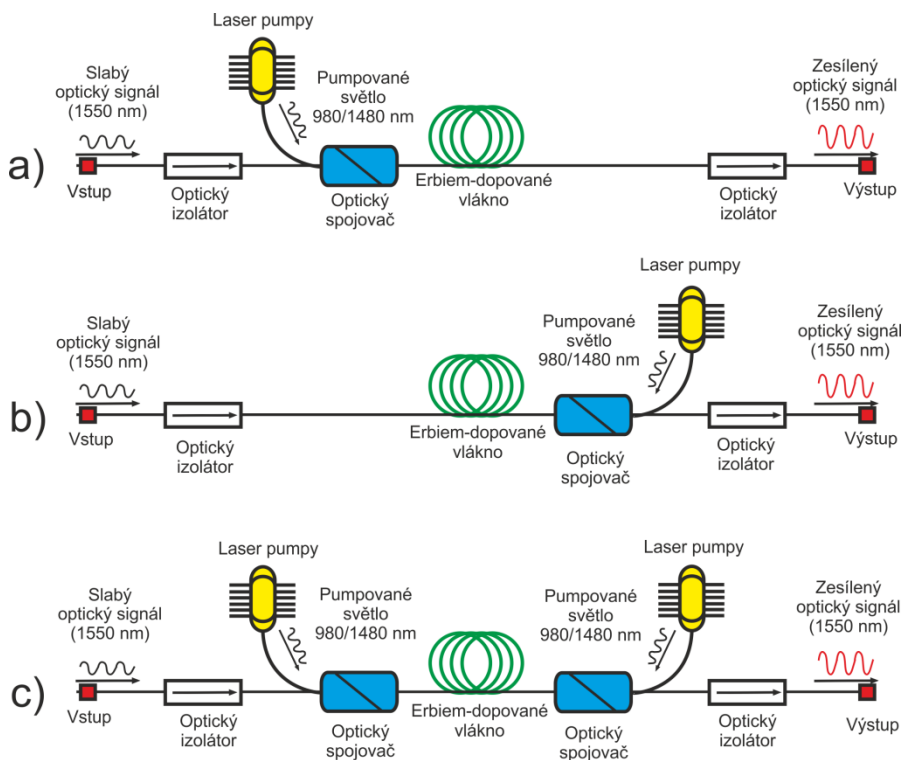
Obr. 8: Pumpování na vlnové délce 980 nm



Obr. 9: Pumpování na vlnové délce 1480 nm

2.1.4. Typy variant pumpovacích obvodů

Při zapojování pumpovacího (čerpacího) obvodu je možné použít tři nejčastější varianty. Toto je znázorněno na obrázku 10 (Obr. 10). Jako první možnost se nabízí použít variantu, kdy je dopovací světlo pumpováno do optického vlákna v totožném směru jako směr signálu. Je samozřejmě možné pumpovat dopovací světlo do optického vlákna v opačném směru než je směr signálu. Nabízí se také použití kombinace obou těchto způsobů [9].

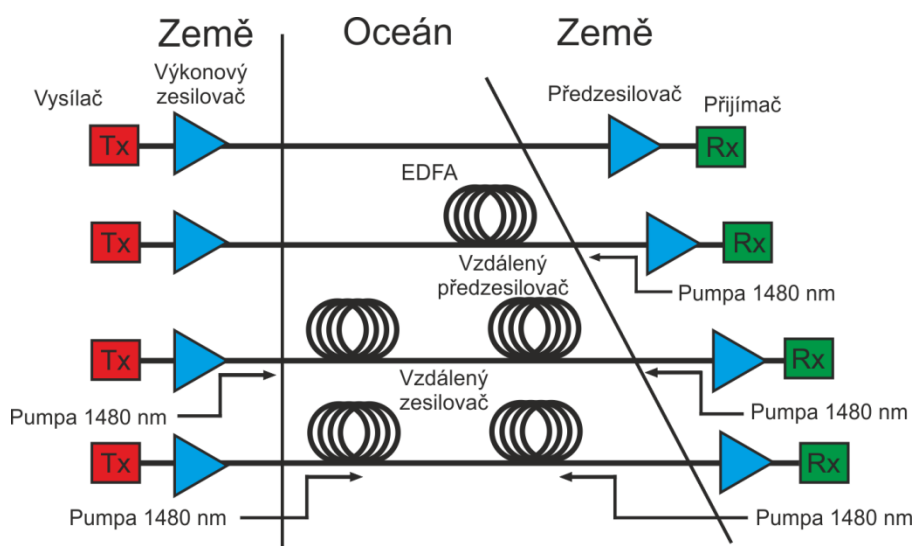


Obr. 10: Typy pumpovacích obvodů[9]

Při pumpování dopovaného světla po směru šíření signálu, je dosaženo lepších šumových vlastností, ale nižší výkon. Toto zapojení je vhodné, pokud je zapojeno jako předzesilovač. Při pumpování dopovaného světla proti směru šíření signálu je dosaženo obvykle vyššího šumu, ale naopak je možné použití vyšších výkonů při samotném pumpování. Při použití vyšších výkonů je následně možné získat i větší výkon celého zesilovače. Toho potom může být využito k zapojení zesilovače jako booster. Při použití dvojitého pumpování je možné použití rozdílných vlnových délek [9].

2.1.5. Vzdálené pumpování

Tento typ pumpování je nutné zmínit, jelikož ne vždy je možné použít pumpování přímo v konkrétním místě. Ať již z důvodu nemožnosti přivést do míst elektrickou energii nebo její zdroj. Konkrétním příkladem takového místa jsou například podmořské dálkové trasy. Na těchto místech je možné umístit zesilovač, ale pumpovací laser, který je energeticky závislý, posunout do vhodnějších míst. Možnosti vzdáleného pumpování jsou zobrazeny na obrázku 11 (Obr. 11) [7].



Obr. 11: Možnosti vzdáleného pumpování [7]

První je na obrázku 11 (Obr. 11) uvedeno zapojení bez vzdáleného pumpování. Toto zapojení je realizováno jen s použitím zesilovače na začátku trasy a na jejím konci. Na začátku je signál zesílen na maximální možnou úroveň a zesilovač na konci signál zesílí, aby bylo možno signál detekovat. Ovšem toto řešení není nejvhodnější, jelikož to nese určitá omezení v podobě kratších překlenutelných vzdáleností a omezení přenosové kapacity.

Další je na obrázku 11 (Obr. 11) znázorněno zapojení s použitým EDFA zesilovačem na trase a se vzdáleným pumpováním. Dále je znázorněno zapojení pumpování z obou konců optické trasy. Při obou těchto zapojeních bylo použito pro přivedení pumpovacího signálu optické nízkoztrátové vlákno s oddělením od vlákna pro přenášení signálu.

Poslední je na obrázku 11 (Obr. 11) vyobrazeno zapojení, kde je opět použito pumpování v obou směrech jako v předchozím případě. Rozdíl je v tom, že pumpovací zdroje jsou přímo připojeny ke vzdáleným Erbiem dopovaným vláken. Je třeba zmínit, že vzdálené pumpování má také svá negativa. Jelikož se při něm používají vysoké výkony, objevují se zde více negativní jevy v podobě disperze, Brillouinůva rozptylu a nelineárních jevů [7].

2.1.6. Absorpce pumpovaného světla

Absorpce pumpovaného světla ovlivňuje významně konečný výsledek zesílení. Cíl při absorpci světla je, aby předání dopované energie z pumpovacího laseru dosáhlo co nejvyšších hodnot a byl co nejvíce efektivní. U absorpce pumpovaného světla je nutné zmínit další parametr, šířku absorpčního pásu. Šířka absorpčního pásu je v přímé souvislosti s šířkou pásma pumpovacího (čerpacího) laseru. Z tohoto důvodu se konstrukce přizpůsobuje tak, aby se tyto pásma překrývaly. Stupeň absorpce je možné vyjádřit vztahem [10]:

$$A = 1 - e^{-(N_{dop} \sigma_{abs} L)} \quad (2.1)$$

,kde N_{dop} je dopovaná koncentrace, L je délka dopovaného média a σ_{abs} je takzvaná absorpce přechodové části na pumpovací vlnové délce.

Kromě toho, že je hodnota absorpce závislá na vlnové délce, je možné míru absorpce ovlivnit také pomocí polarizace pumpovacího zdroje nebo polarizace dopovaného vlákna. Řešením je správné nastavení obou polarizací proti sobě [10].

2.1.7. Dopovací vlákna

V této kapitole bude popsána podrobněji problematika dopovacích vláken. Popsány budou jak různé druhy dopantů, tak i matrice, do kterých se dopanty přidávají.

2.1.8. Typy dopantů

Jako první a nejčastější dopant, který se přidává při vytváření dopovaných vláken, je Erbium.

Erbium lze popsat jako přechodný kovový prvek bíle stříbřité barvy. Tento prvek patří do skupiny lanthanoidů a má elektronovou konfiguraci 2, 8, 18, 30, 8, 2. V tabulce 2 (Tab. 2) je znázorněno množství energie, které je potřeba pokud chceme skrz ionizaci docílit iontu Erbium Er^{3+} [11].

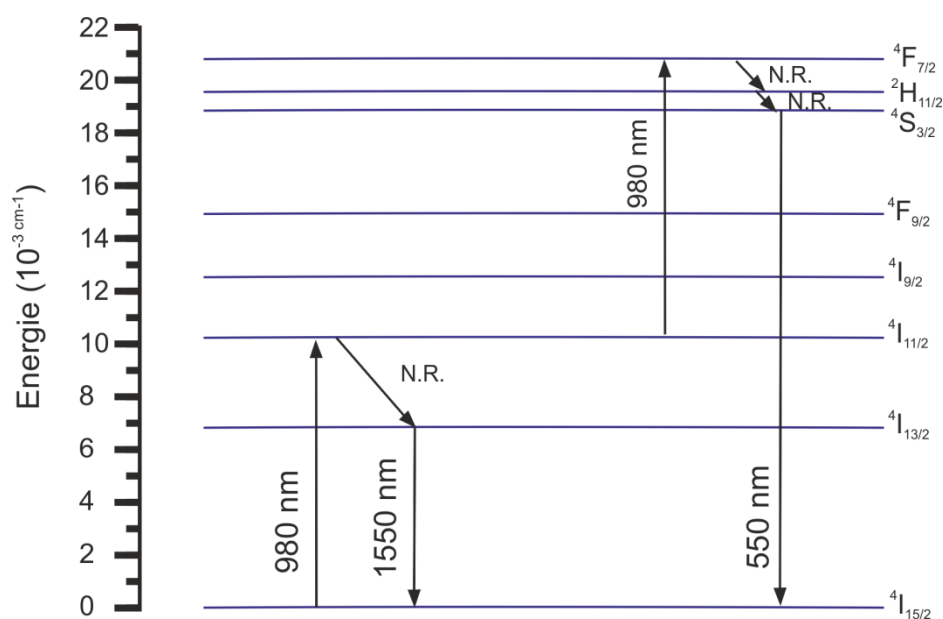
Ionizační energie	1. : 589,3 kJ.mol ⁻¹
	2. : 1150 kJ.mol ⁻¹
	3. : 2194 kJ.mol ⁻¹

Tab. 2: Ionizační energie Erbium[11]

Tyto ionty Er^{3+} jsou následně velice často používány v optoelektronice. Toto je dáno skutečností, že mají dobré fluorescentní vlastnosti a to převážně na vlnových délkách 1530 až 1570 nm. Z tohoto důvodu jsou předurčeny pro využití v telekomunikacích. Princip tohoto jevu je vysvětlen dále.

Pokud je použita pumpa o vlnové délce 980 nm, pak je vyexcitován iont z hladiny $4I_{15/2}$ až do hladiny $4I_{11/2}$. Po tomto přesunu následuje další přechod na hladinu $4I_{13/2}$, který je rychlý a nezářivý. Tato hladina slouží jako metastabilní hladina. Ionty se vyskytují na této hladině přibližně 10 ms. Pokud ovšem dojde k zpětnému přechodu z hladiny metastabilní do hladiny nejnižší, vygeneruje se při tomto přechodu foton. Tento foton má vlnovou délku, která se pohybuje kolem 1530 nm. Tento přechod je vlastně stimulovaná emise [11].

Hlavní fluorescence v dopantu Erbium probíhá mezi hladinami $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$, ale je pravděpodobné, že inverze populace probíhá také na přechodu mezi $4I_{11/2} \rightarrow 4I_{15/2}$. Z níže uvedeného obrázku 12 (Obr. 12) je možné rozpoznat, že hladina $4F_{7/2}$ má energii, která se rovná energii dvou fotonů. Pokud vyexcitovaný iont přijme energii dvou fotonů, je pravděpodobné, že se dostane na tuto hladinu. Z této hladiny pak může klesnout na hladiny $4I_{9/2}$, $4I_{11/2}$, $4I_{13/2}$, $4I_{15/2}$ s emisí světla o vlnové délce 1720 nm, 1220 nm, 850 nm nebo 550 nm [11].



Obr. 12: Schéma energetických úrovní pro Er^{3+} [11]

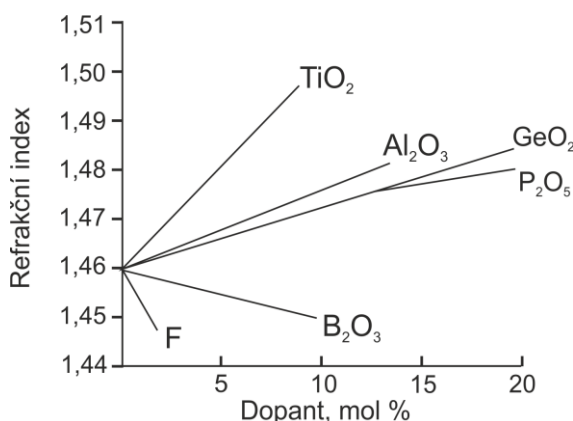
V tabulce 3 (Tab. 3) jsou shrnuty možnosti využití Erbiumu pro zesilovací vlákna a k nim přiřazené parametry.

Vlnová délka laseru	Vlnová délka laseru pumpy	Koncentrace Erbiumu	Délka vlákna	Další prvky	Mezní práh	Efektivita	Výstupní výkon / max. výkon pumpy
1.566 μm	514.5 nm	35 ppm Er ion	13 m	Ar-ion laserová pumpa	44 mW	10 %	56 mW / 0.6 mW
~1.56 μm	532 nm	150 ppm Er_2O_3	1 m	Ring laser	10 mW	5.1 %	1.8 mW / 45 mW
1.535 μm	532 nm	100 ppm Er	15 m	Dvojitý Nd:YAG	NA	28 %	1 W / 3.6 W
1.56 μm	806 nm	500 ppm Er	3.7 m	LD pole pump	10 mW	16 %	8 mW / 56 mW
1.62 μm	808 nm	300 ppm Er	1.5 m	LD pumpa	3 mW	3.3 %	0.13 mW / 7 mW
1.56 μm	980 nm	0.08 wt% Er	0.9 m	Dye laser	2.5 mW	58 %	4.7 mW / 11.3 mW
~1.54 μm	980 nm	1100 ppm Er	9.5 m	Ti:sapphire / Laditelný	>10 mW	>49 %	260 mW / 540 mW
1.552 μm	~1.46 μm	1370 ppm Er ion	5 m	2 LD pumpy	37 mW	14 %	8 mW / 93 mW
1.552 μm	1.47 μm	1370 ppm Er ion	7 m	LD pumpa	44 mW	6.3 %	~1mW / 60 mW
1.555 μm	1.48 μm	~45ppm Er	60m	LD pumpa / Ring laser	6.5 mW	38.8 %	3.3 mW / 15 mW
~1.56 μm	1.48 μm	110 ppm Er_2O_3	42.6m	LD pumpa	4.8 mW	58.6 %	14.2 mW /

Tab. 3: Charakteristika Erbiumem dopovaných vláknových laserů[12]

2.1.9. Materiál používaný pro matrice

Matrice slouží jako materiál, do kterého se dopant může přidat. Jako základ se používá křemičité sklo, pokud se jedná o Erbiumem dopované vlákno. V jiných případech je možné použít například Oxidové sklo, Halidové sklo nebo Chalkogenové sklo. Do tohoto základu se pak přidávají různé příměsi pro zlepšení jeho vlastností. Pro úpravu refrakčního indexu je možné použití těchto příměsí. Pokud chceme zvýšit refrakční index, je možné použít příměsi s oxidem germaničitým (GeO_2), oxidem titaničitým (TiO_2), oxidem hlinitým (Al_2O_3) a s oxidem fosforečným (P_2O_5). Pokud ovšem chceme refrakční index snížit, je vhodné použít oxid boritý (B_2O_3). Na následujícím obrázku 13 (Obr. 13) je znázorněna závislost refrakčního indexu na použité příměsi [11].



Obr. 13: Refrakční index nejčastěji používaných dopantů pro sklo[11]

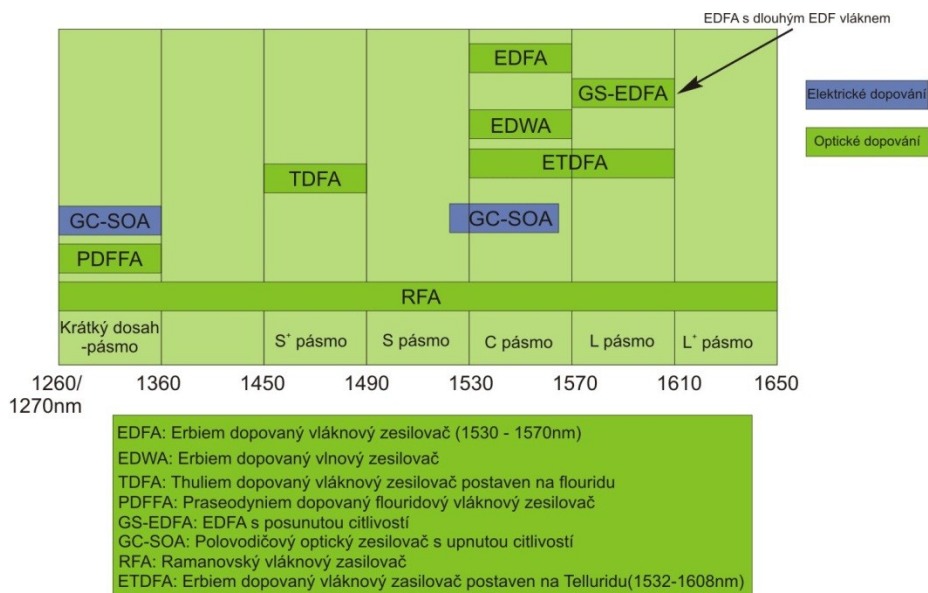
2.1.10. Jiné typy používaných dopantů

Jako dopant se ovšem nevyužívá jen Erbium, ale také jiné vzácné dopanty. Jako dopanty je možné použít také Neodymium, Holmium nebo Yterbium a další, které jsou uvedeny v tabulce 4 (Tab. 4) níže. Pro každý z dopantů je nutné přizpůsobit vlnovou délku buzení. To je skutečností, že každý z těchto dopantů potřebuje jiné světlo pro buzení a také emituje světlo na jiné vlnové délce.

Iont	Obvykle používaná média	Důležité vlnové délky (μm)
Neodymium (Nd3+)	YAG, YVO4, YLF, křemík	1.03–1.1, 0.9–0.95, 1.32–1.35
Ytterbium (Yb3+)	YAG, tungstate, křemík	1.0–1.1
Erbium (Er3+)	YAG, křemík, tellurite, chalcogenové sklo	1.5–1.6, 2.7, 0.55
Thulium (Tm3+)	YAG, křemík, fluoridové sklo	1.7–2.1, 1.45–1.53, 0.48, 0.8
Holmium (Ho3+)	YAG, YLF, křemík	2.1, 2.8–2.9
Praseodymium (Pr3+)	křemík, fluoridové sklo	1.3, 0.635, 0.6, 0.52, 0.49
Cerium (Ce3+)	YLF, LiCAF, LiLuF, LiSAF, a podobné fluoridy	0.28–0.33

Tab. 4: Parametry pro jiné používané dopanty[13]

Na dalším obrázku 14 (Obr. 14) jsou uvedena pásma, ve kterých pracují dané vláknové zesilovače s použitím různých dopantů. Je vhodné zmínit, že Ramanovské zesilovače jsou schopny zesílit široké pole vlnových délek nebo optických přenosových pásem. Naproti tomu u xDFA zesilovačů jsme omezeni typem dopantu využitého pro zesílení daného spektra.

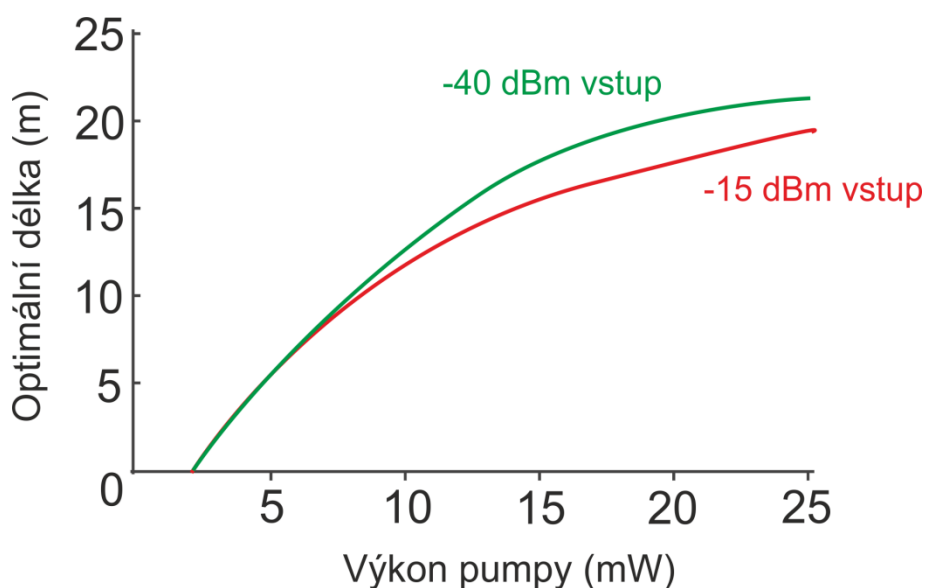


Obr. 14: Typy zesilovačů [14]

2.1.11. Délka zesilovacího vlákna

Obecně u xDFA zesilovačů je jedním z hlavních parametrů nalezení ideální délky zesilovacího vlákna. Ideální délka dopovaného vlákna je závislá na úrovni dotace jádra vlákna použitým dopantem. V souvislosti s tímto je dána také absorpce, která se většinou udává v přepočtu na jeden metr vlákna. Hodnota absorpce je uvedena ve specifikaci od výrobce dopovaného vlákna.

Na následujícím obrázku 15 (Obr. 15) je znázorněno zvyšování výkonu pumpy až do saturace. Poté však začíná zisk ztrácet. Z tohoto důvodu je nutné nalézt ideální délku Erbiem dopovaného vlákna. Při výrobě výrobci experimentují s jinými příměsi než Erbium a snaží se dosáhnout zlepšení v možnosti použití kratších vláken s větší absorpcí [7].

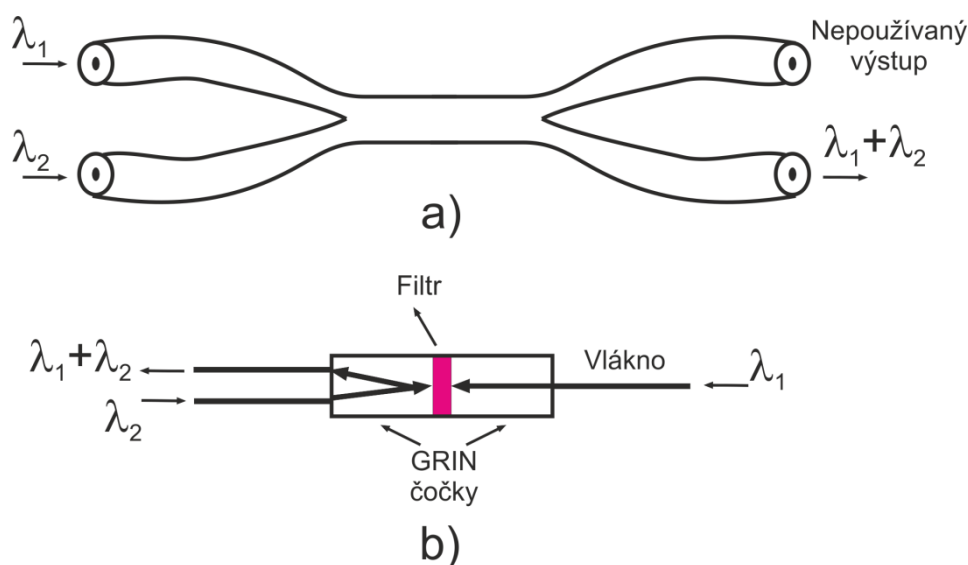


Obr. 15: Optimální délka vlákna pro zisk na vlnové délce 1530 nm s pumpou na 980 nm [7]

2.2. Další komponenty používané v EDFA zesilovačích

2.2.1. WDM slučovač

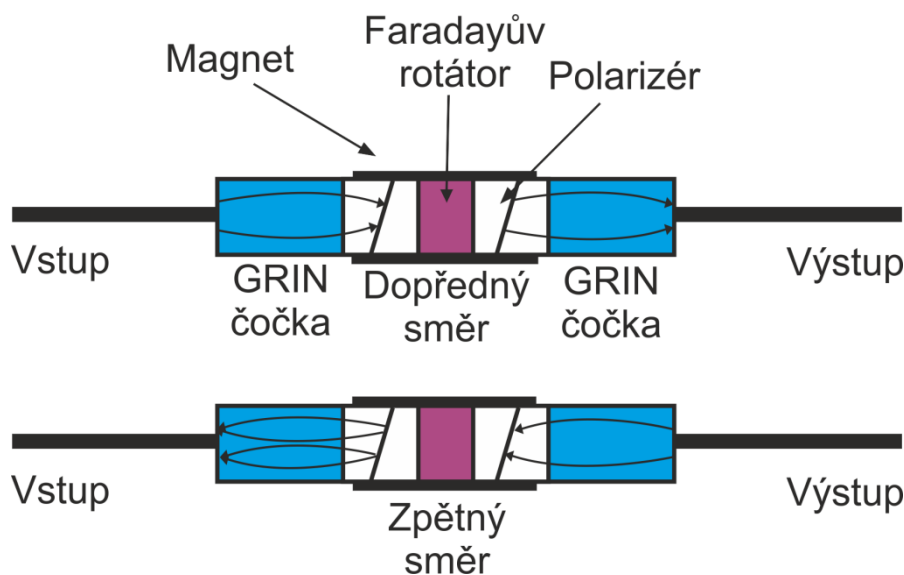
Tato komponenta slouží pro sloučení původních paprsků signálu s paprsky z pumpovacího (čerpacího) zdroje a sloučit je do dopovaného vlákna. Hlavními parametry jsou vložené ztráty pro obě větve. Jako další parametry je nutné zmínit také dělicí a izolační poměr. Oba tyto parametry jsou polarizačně závislé. V rámci konstrukce spojovače jsou používány dva principy. Spojovač se spojenými vlákny (Obr. 16a) nebo spojovač s miniaturizovaným filtrem (Obr. 16b). Oba tyto typy jsou zobrazeny na obrázku 16 (Obr. 16) níže [15].



Obr. 16: a) Spojovač se spojenými vlákny b) spojovač s miniaturizovaným filtrem [15]

2.2.2. Izolátor

Optické izolátory bývají umísťovány do trasy například kvůli vznikajícím Fresnelovým odrazům, které jsou způsobené konektory nebo například kvůli Rayleighovu rozptylu. Tyto jevy mohou negativně ovlivňovat světelné zdroje připojené například na vstup zesilovače. Nejedná se pouze o výkyvy výkonu, ale také spektrální rozladování. Optické izolátory mohou například zabránit odrazení zpětného ASE šumu na vstupu zesilovače a díky tomu zkvalitnit odstup signálu od šumu. Na obrázku 17 (Obr. 17) níže, můžeme vidět typickou strukturu polarizačně nezávislého izolátoru. Na tomto obrázku 17 (Obr. 17) je znázorněn izolátor, jak v propustném, tak v nepropustném směru [15].



Obr. 17: Dopředné a zpětné zapojení izolátoru[15]

Funkce izolátoru je následující. Při průchodu paprsku v propustném směru je paprsek nejprve rozdělen pomocí GRIN čočky na dva paprsky, poté následuje dvojlomný hranol (TiO_2). Další v pořadí se nachází Faradayův rotátor složený z krystalu $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Ten je obklopený permanentním magnetem. To způsobuje otočení obou paprsků o 45° . Pokud jsou paprsky takto otočené, mohou se poté opět spojit při průchodu skrze druhý dvojlomný hranol a následně projít izolátorem.

Naopak při průchodu paprsku z druhé strany, jsou paprsky otočeny o 90° a to způsobí, že se nedostanou na výstup izolátoru. Pro dosažení lepších vlastností se na jednotlivých přechodech využívají antireflexní nátěry. Izolátory jsou konstruovány vždy pro specifické vlnové délky odpovídající použitému materiálu [15].

2.3. Popis Ramanovských typů zesilovačů

Tyto zesilovače využívají stimulovaného Ramanova rozptylu neboli SRS (Stimulated Raman Scattering). Jako médium je zde použito optické vlákno nebo také krystal. Při průchodu vstupního signálu je tento signál zesilován. Vstupní signál může procházet médiem ve směru nebo proti směru šíření paprsku z pumpovacího (čerpacího) laseru. V případě křemíkových vláken je možné dosáhnout největšího zisku, pokud je rozdíl mezi zesilovaným a čerpaným signálem 10 až 15 THz.

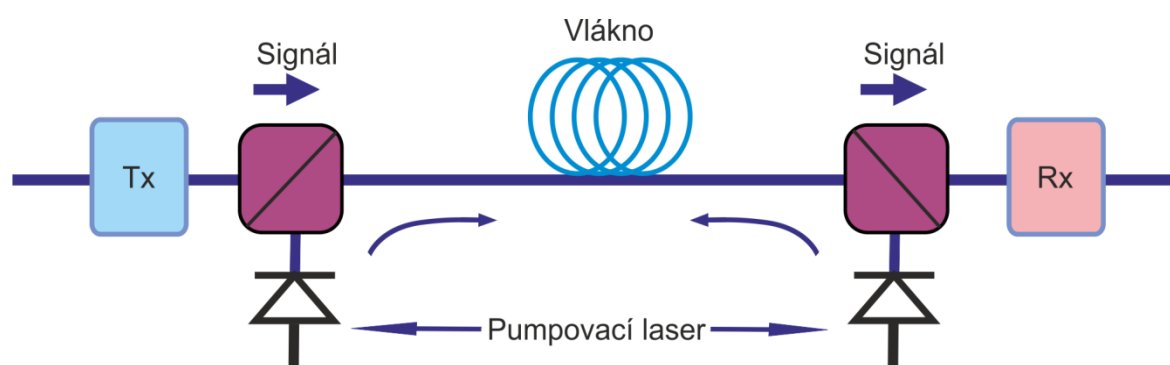
V Ramanovských zesilovačích se většinou využívají obyčejná optická vlákna. Tyto vlákna nejsou dopovány žádnými ionty vzácných zemin. Díky tomu je možné pro účel zesilování využít i samotná vlákna pro přenos. U Ramanovských zesilovačů se můžeme setkat také se speciálními vlákny, které jsou dopovány ionty vzácných zemin. Jsou to například vlákna dopovaná Germaniem. Uplatnění najdou tato speciální vlákna, pokud je nutné zesílit optický signál na kratší délce vlákna. Dále můžeme Ramanovské zesilovače rozdělit na dva typy.

První z nich je DRA neboli Distributed Raman Amplifier. V tomto rozprostřeném Ramanovském zesilovači se ztráty vyrovnávají v každém bodě v celé délce přenosové trasy. Největší výhodou této metody spočívá v tom, že hodnota šumového čísla (SNR) neklesá tak rapidně jako je tomu například u přenosových systémů, kde je použit diskretní zesilovač. Těto výhody je pak využito pro překlenutí větší vzdálenosti mezi zesilovači v optické trase, a proto je tento typ Ramanovského zesilovače nasazován pro vlákna, která jsou delší než 50 km.

Druhý typ je LRA neboli Lumped Raman Amplifier. Při použití tohoto typu diskretního Ramanovského zesilovače je zesilovač umístěn v jednom místě na optické přenosové trase. Musí být přizpůsoben vlastnostmi na požadovanou šířku pásma. Pokud chceme zvětšit šířku pásma je použití tohoto zesilovače vhodné. Při nasazení diskretního Ramanovského zesilovače se pohybuje délka vlákna kolem 5 km [2][16].

2.3.1. Schéma Ramanova zesilovače

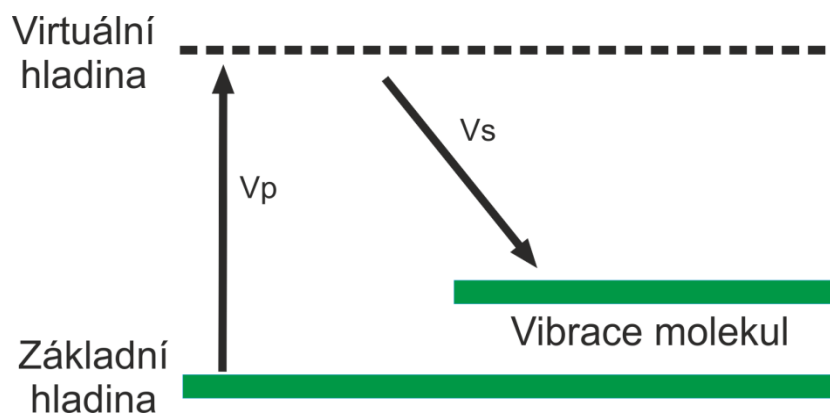
Jako zdroj energie je použito optického záření. Proto je kvalitní pumpovací (čerpací) zdroj nezbytným prvkem pro Ramanovské zesilovače. Pro tyto účely je možno použít polovodičovou laserovou diodu nebo Ramanův vláknový laser (RFL). Pro vlnové délky 1500 nm až 1600 nm se používá zdroj s vlnovou délkou přibližně 1400 nm. Schéma je uvedeno na obrázku 18 (Obr. 18).



Obr. 18: Schéma optické sítě založené na použití Ramanovských zesilovačů[16]

2.3.2. Průběh zesílení

Jak již bylo zmíněno, při zesílení je využito Ramanova rozptylu. Při tomto procesu je dopadající světlo změněno a má nižší frekvenci. Poté je molekula materiálu vybudena na virtuální hladinu pomocí fotonu z čerpacího zdroje. Při poklesu této molekuly na nižší hladinu je uvolněn signálový foton. Následný rozdíl je rozptýlen vibracemi molekul hostitelského materiálu mezi čerpacím a signálovým fotonem. Podle těchto vibrací je následně ovlivněn frekvenční posuv a tvar křivky Ramanova zisku. Princip zesílení v Ramanovských zesilovačích je znázorněn na obrázku 19 (Obr. 19) [2] [16].



Obr. 19: Princip zesilování v Ramanovských zesilovačích[16]

2.3.3. Zhodnocení vlastností Ramanova zesilovače

Mezi přednosti Ramanova zesilovače patří možnost použití a provozu na různých vlnových délkách a to v závislosti na čerpacím zdroji záření. Pokud je naráz použito několik čerpacích vlnových délek je možné upravit spektrum zisku. Ramanovské zesilovače jsou stále více nasazovány a jsou konkurenty především pro EDFA zesilovače. Avšak ve srovnání s dopovanými zesilovači je pro Ramanovské zesilovače zapotřebí použití delšího vlákna. Výhodou je, že je možné použít vlastní optické přenosové vlákno.

Ramanovské zesilovače mají ovšem i své limity a omezení. Například spontánní rozptyl se projevuje podobně jako spontánní emise záření a přidává se k zesílenému signálu. To se projevuje jako šum, protože spontánně generované fotony mají náhodnou fázi. Jak velký je tento šum, závisí především na koncentraci fotonů ve vibrujícím stavu. Koncentrace fotonů ve vibrujícím stavu je značně ovlivněna teplotou zesilovače. U Ramanovských zesilovačů také platí, že zisk je závislý na polarizaci [16].

3. Jevy negativně ovlivňující přenos signálu

Optická vlákna jsou dnes nasazována nejen v páteřních sítích, ale stále více také zavedena přímo ke koncovým uživatelům. Toto je zapříčiněno nejen neustálými pokroky v oblasti optiky, ale také mírně klesající cenou a neustálým tlakem zvyšovat přenosovou rychlost. Avšak i přes veškeré pokroky ve výzkumu musíme brát stále v potaz jevy, které negativně ovlivňují přenos signálu v optických vláknech. Tyto jevy jsou dány ať už fyzikálními vlastnostmi nebo limity optického vlákna. Tato část práce více pojednává právě o těchto jevech.

3.1. Útlum

Optická vlákna jsou velmi vhodná pro přenos dat na velké vzdálenosti, ale i přesto u nich dochází k útlumu. Tento jev je možné popsat také jako ztráta intenzity optického signálu, ke které dochází při průchodu trasou. Útlum může být způsoben různými vlivy. Například absorpcí v jádře a plášti optického vlákna. Může se také jednat o Rayleighův rozptyl, který je popsán níže. Útlum je také vidově závislý. Jednotkou útlumu je dB neboli Decibel. Hodnota útlumu slouží jako měřítko ztrát optické energie ve vláknech. Útlum ve vláknu se vypočítá pomocí následujícího vzorce [19], [21].

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} [dB] \quad (3.1)$$

Kde P_{OUT} je výstupní výkon, P_{IN} je vstupní výkon a útlum je vyjádřen jako α v dB.

Samozřejmě je možné a v praxi velmi vhodné vypočítat útlum, který je vztažený k jednotce délky obvykle v kilometrech. Tento takzvaný měrný útlum vypočítáme pomocí následujícího vzorce:

$$a = \frac{A(dB)}{L} = -\frac{1}{L} \cdot \log\left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}\right) [dB \cdot km^{-1}] \quad (3.2)$$

3.1.1. Ztráty absorpcí

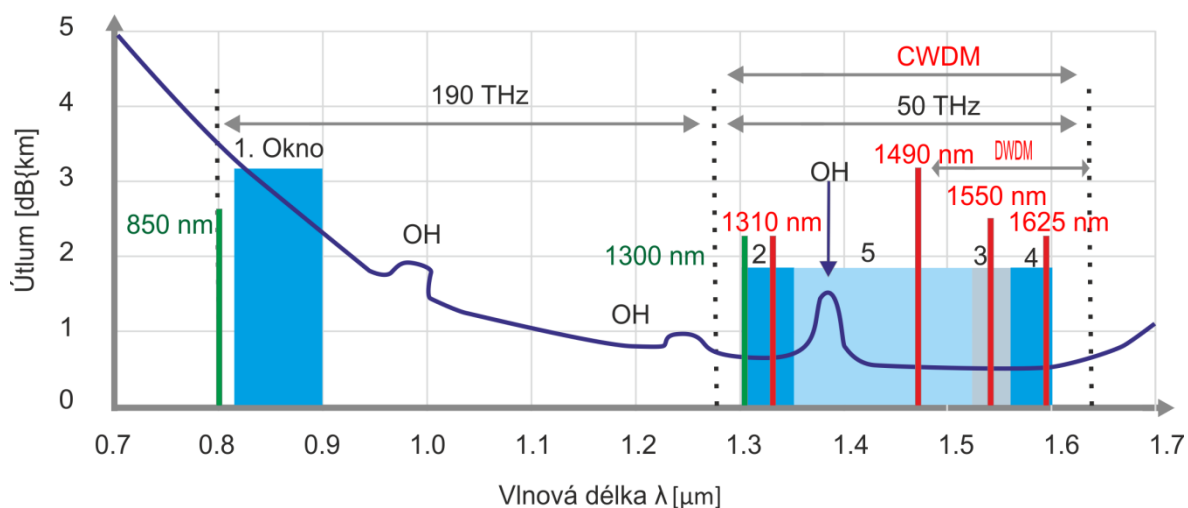
Princip jevu ztráty absorpcí spočívá v tom, že se elektromagnetická energie přeměňuje na energii tepelnou. U optických vláken, která jsou používána pro telekomunikační účely, se nárůst tepla, ke kterému dochází vlivem provozu, velice obtížně měří. Obtížnost měření je dána velmi malým zvýšením tepla. Absorpce může být zapříčiněna samotnou absorpcí oxidu křemičitého. Tato absorpce se ale dá, při běžně používaných vlnových délkách 0,8 až 1,6 μm , zanedbat. Dále se můžeme setkat s absorpcí v ultrafialové oblasti. Tato absorpce už není tak zanedbatelná a je zapříčiněna valenčními elektrony. Je nutné dodat, že tato absorpce představuje stále neodstranitelný problém.

Jako poslední je nutné zmínit absorpci v infračervené oblasti. Tuto absorpci způsobuje kmitání celých molekulových útvarů. S touto absorpcí se však dá manipulovat a to tak, že je standardní materiál SiO_2 nahrazen jinými materiály, které mají molekulové útvary těžší, a tak je světlo nedokáže rozkmitat viz tabulka 5 (Tab. 5) níže. Negativním aspektem pro toto řešení může být rapidně vyšší cena těchto vláken a také fakt, že je nutné použití velmi kvalitních zdrojů a detektorů záření. Tabulka níže uvádí vlnovou délku maxima absorpce a útlum v jednotkách $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ při poměru nečistot $1 \cdot 10^9$. To reprezentuje jeden atom příměsi na miliardu atomů vlastního materiálu.[20].

Ionty	Vlnová délka maxima absorpce (nm)	Útlum ($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)
Cr^{3+}	625	1,6
C^{2+}	685	0,1
Cu^{2+}	850	1,1
Fe^{2+}	1100	0,68
Fe^{3+}	400	0,15
Ni^{2+}	650	0,1
Mn^{3+}	460	0,2
V^{4+}	725	2,7

Tab. 5: Přehled příměsí, hodnot absorpce a útlumu[20]

Mezi nejvýznamnější příčiny ztrát a tedy i útlumu se řadí příměsová absorpce. Tato absorpce je způsobena vodními ionty (OH). Tato absorpce vzniká již při výrobě optického vlákna. Nejvyšší vrcholy této absorpce se vyskytují kolem vlnových délek 950 nm, 1244 nm a 1383 nm. Toto je znázorněno na obrázku 20 (Obr. 20). V dnešní době je však možné tento problém redukovat, pokud se vlákno správně navrhne s ohledem na tento problém. Znamená to tedy, že pokud je dosaženo jakostní výroby je OH potlačeno.[20].



Obr. 20: Přenosová okna v optických sítích[20]

3.1.2. Ztráty rozptylem

Ztráty rozptylem vznikají většinou už při samotné výrobě optických vláken. Rozptylové ztráty vznikají nejčastěji na nečistotách v optických vláknech. Mohou vznikat také na fluktuacích krystalické mřížky.

Při popisu ztrát rozptylem je nutné zmínit Rayleighův rozptyl. Tento jev je z technologického hlediska neodstranitelný a je způsoben tepelnými kmity krystalické mřížky. Tvoří se na částech menších než je vlnová délka. Z toho lze odvodit, že pokud se zvyšuje vlnová délka, pak Rayleighův rozptyl klesá. Rayleighův rozptyl lze vyjádřit rozptylovým koeficientem:

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot kT_F \quad (3.3)$$

Ztrátový koeficient α_R můžeme určit vztahem:

$$\alpha_R = \frac{A}{\lambda^4} \quad (3.4)$$

kde A je koeficient Rayleighova rozptylu a λ vlnový délka.

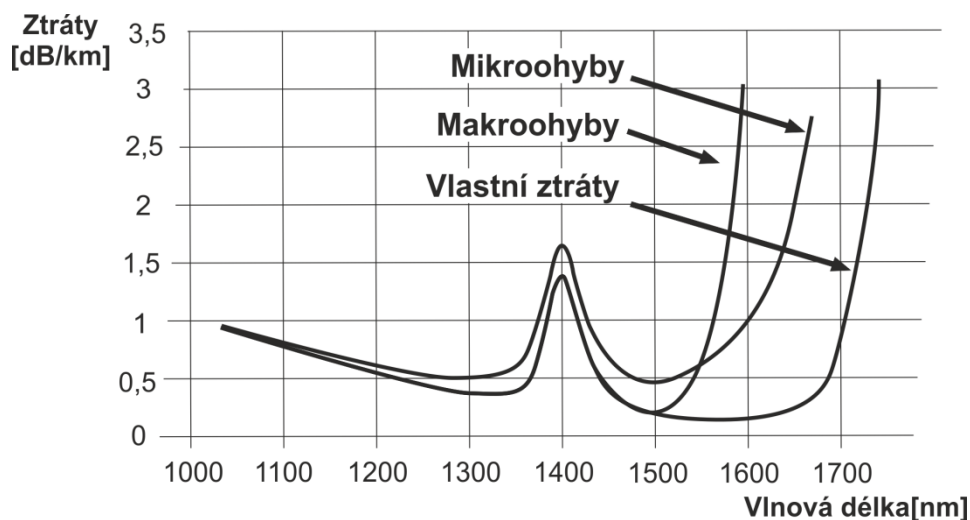
Zdánlivým řešením by bylo používání vlnových délek v infračervené oblasti. Jak již bylo zmíněno výše v části pojednávající o absorpci, toto řešení není možné právě z důvodu vysoké absorpce v infračervené oblasti [21][22].

3.1.3. Ztráty vyzařováním

Tyto ztráty vznikají vlivem lomu šířících se paprsků na rozhraní dvou dielektrických prostředí. Tato prostředí mají odlišné vlastnosti. Při tomto jevu je část energie vyzařena z jádra ven [21].

3.1.4. Ohybové ztráty

Ohybové ztráty vznikají při porušení podmínky totálního odrazu. Porušení této podmínky nastává, když se změní úhel šíření ve vlákně. Paprsek světla poté dopadá pod větším úhlem a tímto vlivem se láme do pláště. Ztráty vlivem ohybu je možno redukovat navržením trasy s velkými poloměry zakřivení nebo případně zkrácením vlnové délky. V praxi je většinou volen kompromis mezi těmito řešeními. Na následujícím obrázku 21 (Obr. 21) je znázorněn vztah mezi útlumem způsobeným ohyby a vlnovou délkou[21].



Obr. 21: Vztah mezi útlumem způsobeným ohyby a vlnovou délkou[21]

U ztrát způsobených disperzí nedochází ke ztrátám jako takovým. Při disperzních jevech nedochází k úbytkům energie, ale navázaná energie je do vlákna rozprostřena v čase. Disperzní jevy můžeme dále rozdělit na disperzi, módovou, chromatickou a polarizačně vidovou.

3.1.5. Módová disperze

Tato disperze vzniká, protože jednotlivé módy se šíří v rozdílných optických trasách a jejich časy šíření ve vlákne jsou rozdílné. Odstranění módové disperze, dosáhneme například použitím co nejúžší šířky spektrální čáry laseru nebo použitím jednovídných vláken. Nevýhodou jsou některá omezení, která z toho plynou a také fakt, že jednovídná vlákna jsou finančně dražší. Díky lepším disperzním parametrům je možné pro částečné odstranění použít i gradientní vlákna. Ty se také v praxi při nasazení mnohavidových vláken často používají. Gradientní index lomu lze vyjádřit vztahem níže[21].

$$n^2(r) = n_1^2 \times \left[1 - 2\Delta \times \left(\frac{r}{a} \right)^g \right] \quad (3.5)$$

kde $n(r)$ je profil indexu lomu v jádře vlákna, Δ je relativní rozdíl indexů lomu jádra n_1 a pláště n_2 daný vztahem:

$$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2} \quad (3.6)$$

dále pak a je poloměr jádra daného typu vlákna, g je parametr mocninného profilu a r je vzdálenost daného bodu od osy vlákna.

3.1.6. Vlnovodná disperze

Její vznik je zapříčiněn změnou tvaru vidu s vlnovou délkou. Podstata ovlivnění optického signálu tkví v jeho závislosti na geometrických rozměrech optického vlákna. Tato disperze je zanedbatelná u mnoho-módových vláken. U jednovíkových je tato disperze důležitá a to proto, že parametr této disperze je vždy záporný. Toho lze dobře využít při kompenzování materiálové disperze. Koeficient vlnovodné disperze je dán vztahem[21]:

$$D_w = -\frac{n_1 - n_2}{c^\lambda} \cdot V \frac{d^2 \cdot (V \cdot b)}{d \cdot V^2} \quad (3.7)$$

3.1.7. Profilová disperze

Tuto disperzi je možné popsat jako závislost poměrného indexu lomu jádra a pláště optického vlákna na vlnové délce. Hodnota profilové disperze je 0.5 ps/nm.km. Díky této hodnotě se tato disperze většinou ignoruje zvláště pak při použití větších vlnových délek.

Profilová disperze se obvykle značí parametrem P a je dána vztahem[21]:

$$P = \frac{\lambda}{\Delta} \times \frac{d\Delta}{d\lambda} \quad (3.8)$$

3.1.8. Materiálová disperze

Tato disperze je zapříčiněna závislostí indexu lomu použitého materiálu optických vláken na vlnové délce zdroje záření. To lze popsat pomocí Sellmeirových vztahů podle vzorců níže[21][23].

$$n^2 = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{A_j}{(\omega_j^2 - \omega^2)} = 1 + \sum_{j=1}^M B_j \lambda^2 \times (\lambda^2 - \lambda_j^2) \quad (3.9)$$

$$A_j = \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m}, B_j = \frac{A_j \lambda_j}{(2\pi c)^2} \quad (3.10)$$

Kde epsilon 0 je permitivita vakua a q je náboj elektronu. Díky této závislosti se každá spektrální část přenášeného signálu šíří různou skupinovou rychlostí.

Elektromagnetická rovinná vlna se prostředím šíří v závislosti na tomto vztahu[23]:

$$\tau = \tau_g \times L = \left(\frac{d\beta}{d\lambda} \right) \times \left(\frac{d\lambda}{d\omega} \right) \times L = \left(\frac{L}{c} \right) \times \left(n - \lambda \times \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (3.11)$$

Kde τ_g je skupinové zpoždění vlny, β je fázová konstanta šíření této vlny, definovaná vztahem[23]

$$\beta = n \times \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \quad (3.12)$$

dále L je délka dráhy daného prostředí, n je index lomu a λ vlnová délka. Budeme-li vycházet z Sellmiových vztahů, že $n=n(\lambda)$, $dn/d\lambda \neq 0$, bude doba zpoždění τ_g pro každou spektrální složku světla putujícího skrze optické vlákno různá. Proto, použijeme-li zdroj signálu se spektrální pološířkou $\Delta\lambda$, dojde k rozšíření přenášených optických pulsů o[21][23]:

$$\Delta\tau = \Delta\lambda \times L \times \left(\frac{d\tau_g}{d\lambda} \right) \quad (3.13)$$

Materiálová disperze společně s profilovou a vlnovodnou disperzí vytváří tzv. disperzi chromatickou.

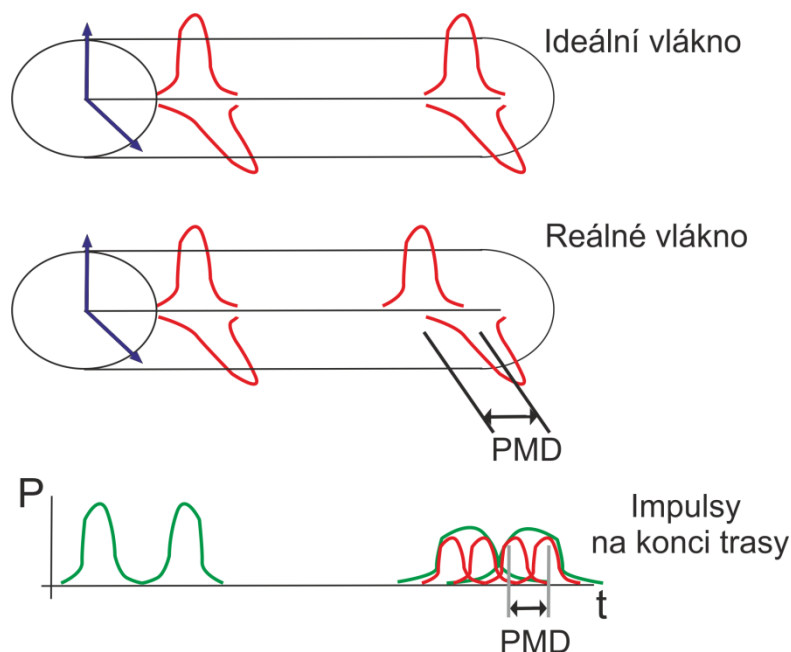
3.1.9. Chromatická disperze

Tuto disperzi způsobuje použitý materiál při výrobě optického vlákna a také použitý zdroj záření, konkrétně jeho spektrální šířka. Chromatická disperze je menší při aplikování laserové diody jako zdroje záření, než při aplikování LED zdroje záření. Chromatická disperze je dána vztahem[21][23].

$$\Delta t_{cd} = \frac{D(\lambda)}{L \cdot \Delta\lambda} \quad (3.14)$$

3.1.10. Polarizačně vidová disperze

Jedná se o zkreslení jednotlivých optických impulsů. Tato disperze se objevuje kvůli rozdílnostem v délce trasy jednotlivých polarizačních rovin vidu, které procházejí vláknem. Při šíření vidu v optickém vlákně, který se skládá ze dvou složek, elektrické a magnetické, které jsou navzájem kolmé, se může stát, že jedna složka se začne opožďovat. Právě díky tomu se přenášený impuls rozšíří. Tento jev je popsán právě jako polarizačně vidová disperze. Na obrázku 22 (Obr. 22) je znázorněna polarizačně vidová disperze [23].



Obr. 22: Znázornění principu polarizačně vidové disperze [23]

Polarizačně vidová disperze je pro vzdálenosti do 10 km vyjádřena následujícím vzorcem [21].

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l} [ps \cdot km^{-1}] \quad (3.15)$$

kde l je délka optické trasy. $\Delta\tau$ představuje zpoždění signálu. Pro vzdálenosti přibližně větší než 10 km je nutné vzorec upravit do dané podoby, která je uvedena níže [21][24].

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} [ps \cdot km^{-1}] \quad (3.16)$$

3.2. Nelineární jevy

Při popisování jevů, které negativně ovlivňují přenos, nesmí být opomenuty nelineární jevy. V následujících kapitolách níže budou postupně rozebrány některé z nich.

3.2.1. Materiálový rozptyl

Při tomto nelineárním jevu dochází k rozptylu světelné vlny. Světelná vlna je rozptýlena vlivem srážek s tepelně, popřípadě akusticky, kmitajícími atomy vlákna. Materiálový rozptyl v důsledku toho způsobuje, že výstupní výkon je odlišný od vstupního výkonu. Také rozptýlená vlna se liší od vlny dopadající ve vlnové délce [21].

3.2.2. Ramanův rozptyl

Neboli také Stimulated Raman Scattering(SRS). Při Ramanově rozptylu dochází k interakci mezi fotony a částicemi světlovodného materiálu. Záření rozptýlené má odlišnou vlnovou délku oproti záření dopadajícímu. Díky tomu dochází k přesouvání energie z vidu s nižší vlnovou délkou do vidu z vyšší vlnovou délkou. Tento přesun energie je znázorněn na obrázku 23 (Obr. 23) níže [2].



Obr. 23: Výsledek stimulované Ramanovy emise [2]

Tento jev lze popsat také vztahem [2]:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.17)$$

,kde h je Planckova konstanta (6.63×10^{-34}), c rychlost světla a λ je vlnová délka. Z tohoto vzorce lze vyvodit, že fotony, které se nacházejí na nižší vlnové délce, by měli mít také vyšší potenciál energie.

Dále můžeme také rozlišit, zda v materiálu použitého pro šíření optického signálu dochází k takzvaným pružným srážkám fotonů s molekulami materiálu nebo k nepružným srážkám. V případě takzvaných pružných srážek se jedná o Rayleighův rozptyl, který byl již popsán. Pokud se však vyskytují srážky nepružné, pak se tento jev nazývá Ramanův rozptyl. Tento rozptyl lze popsat tak, že dopadající foton předá část své energie molekule nebo v jiném případě od ní jisté kvantum energie přijme. Záření, které tímto vznikne, má však rozdílnou frekvenci záření než záření původní. Tento frekvenční posuv záření je nazýván jako Ramanův posuv.

Dále při těchto nepružných srážkách fotonu budícího záření mohou nastat dva stavy. V prvním případě může nastat, že foton bude mít po srážce nižší energii. V druhém případě pak bude mít foton energii po srážce vyšší. Tyto energetické stavy je možné popsat pomocí rovnic níže [2], [25].

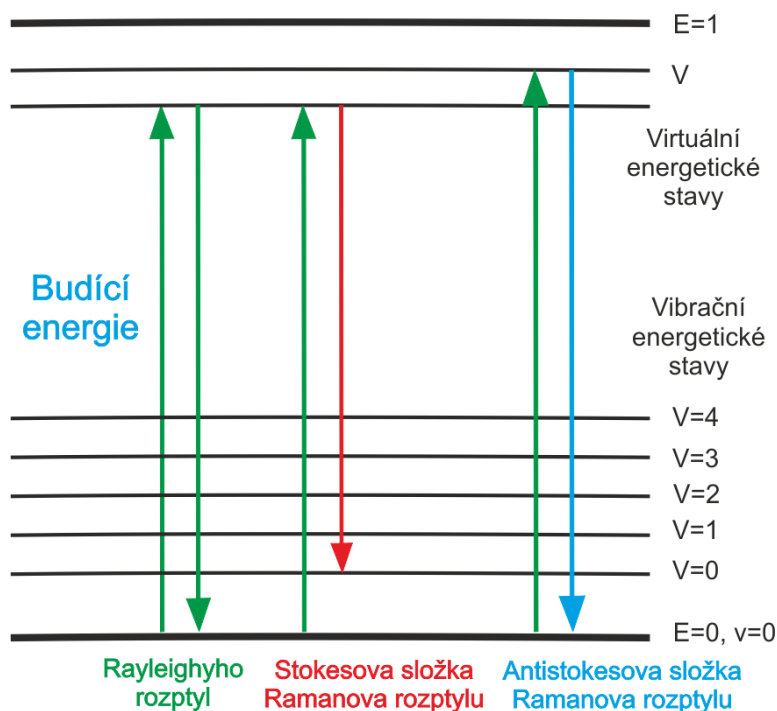
$$E_0 = h \cdot \nu_0 \quad (3.18)$$

$$E_1 = h \cdot \nu_1 \quad (3.19)$$

$$\Delta E = h \cdot (\nu_0 - \nu_1) = h \cdot \Delta \nu \quad (3.20)$$

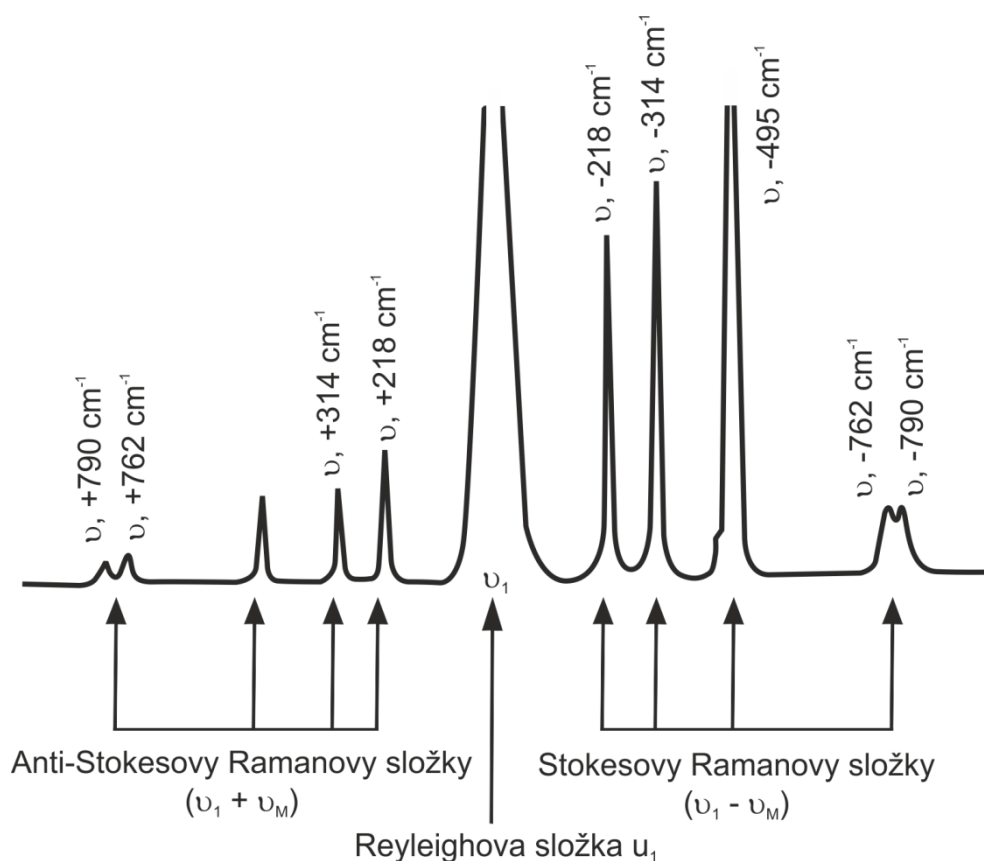
kde E_0 - energie fotonu před srážkou, E_1 - energie fotonu po srážce, ν_0 - frekvence fotonu před srážkou, ν_1 - frekvence fotonu po srážce, ΔE - úbytek energie fotonu způsobený srážkou, $\Delta \nu$ - frekvence Ramanova posunu (frekvence pásu v Ramanově spektru), h - Planckova konstanta.

Při srážce fotonu s molekulou se tato molekula nejprve dostane do takzvaného vibračního stavu. Poté tato molekula klesne na nejnižší vibrační hladinu, která má vyšší potenciál než základní hladina. Toto je znázorněno na obrázku 24 (Obr. 24) [25].



Obr. 24: Princip Ramanova zesílení[25]

Na dalším obrázku 25 (Obr. 25) jsou pak znázorněny Stokesovy a anti-Stokesovy oblasti[26].



Obr. 25: Porovnání Ramanova rozptylu, Rayleova rozptylu [26]

3.2.3. Brillouinův rozptyl

V anglickém originále Stimulated Brillouin Scattering (SBS). Při Brillouinovu rozptylu se monochromatické světlo dostává do interakce s akustickými vlnami ve světlovodu. Tyto akustické vlny vznikají vlivem tepelné vibrace molekul. Akustické vlny v optickém vlákně způsobí pružnou deformaci prostoru v čase a díky tomu dochází k lokální změně indexu lomu. Při interakci nastává frekvenční posun ve zpětném směru. V případě, že chceme Brillouinův rozptyl omezit lze toho docílit například vhodným rozšířením spektra signálu [27].

Brillouinův rozptyl je možné vyjádřit pomocí kvantově-mechanické interakce akustické a optické vlny. Světlo postupující světlovodem si lze představit jako soubor fotonů, to znamená částic s energií jednoho fotonu. Toto lze vyjádřit vzorcem[27]:

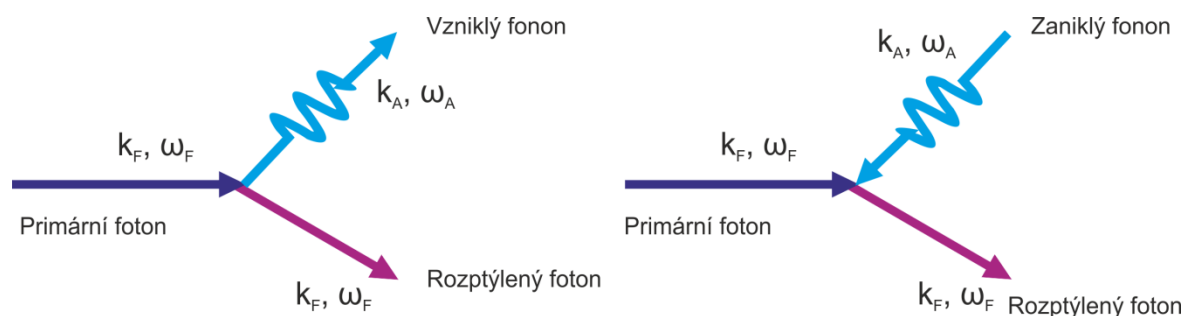
$$E_F = \hbar \quad (3.21)$$

kde ω_F je úhlová rychlost světelné vlny a \hbar je redukovaná Planckova konstanta.

Podobně si můžeme představit také akustickou vlnu jako soubor fononů s energií jednoho fononu [27]:

$$E_A = \hbar \quad (3.22)$$

Z důvodu zákona o zachování energie se součet energie fotonu a vzniklých fononů musí rovnat nově vzniklé energii. Na obrázku 26 (Obr. 26) níže je znázorněn popis vzniku a zániku fononu a předání energie fotonu.



Obr. 26: A) Vytváření a B) absorbování fononu a fotonu[27]

Frekvence akustické vlny bude dána vztahem [27]:

$$\omega_A = 2\omega_F n(\omega_F) \frac{v_F}{c} \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \quad (3.23)$$

Největší změna vlnové délky proběhne, když $\Theta = \pi$, tedy při zpětném šíření. Vlnovou délku rozptýlené vlny můžeme zjistit ze vztahu [27]:

$$\omega'_F = \omega_F \pm \omega_A \quad (3.24)$$

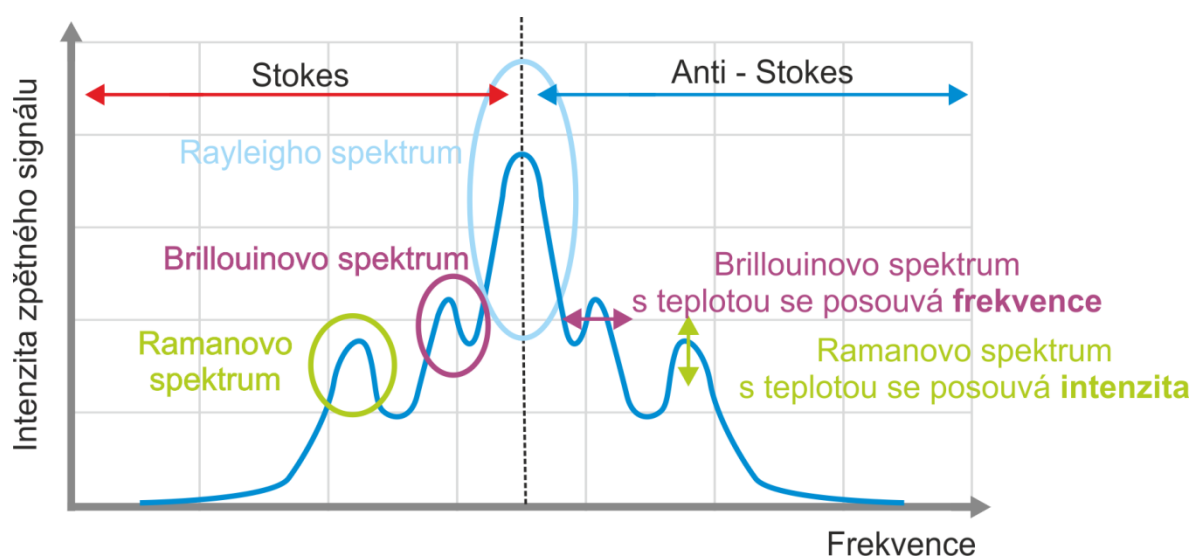
Ze vztahu tedy vyplývá, že při Brillouinově rozptylu vznikají dvě postranní složky původního spektra, kterým říkáme Stokesovy a anti-Stokesovy složky [27].

Hlavním parametrem pro vznik Brillouinova rozptylu je tedy výkon světla, který se snažíme navázat do jádra optického vlákna. Tento výkon je dán vztahem [27]:

$$P_B = 4,4 \cdot 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB} \delta\lambda [W] \quad (3.25)$$

kde d je průměr jádra, α_{dB} je útlum v dB.km^{-1} a $\delta\lambda$ je spektrální šířka zdroje světla v GHz. Obvyklá hodnota P_B u jednojádřových vláken se pohybuje okolo 80 mW.

Na dalším obrázku 27 (Obr. 27) je znázorněn celkový přehled jednotlivých rozptylů a jejich posunů [27].



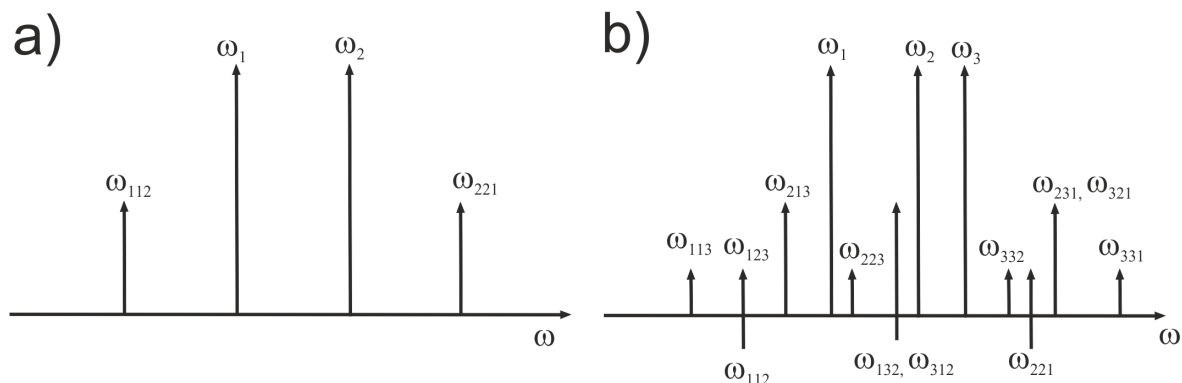
Obr. 27: Ramanovo spektrum rozptýleného záření[35]

3.2.4. Čtyřvlnné směšování

Neboli Four Wave Mixing(FWM). Při tomto jevu se dva a více signálů při různých vlnových délkách dostávají do společné interakce. Při interakci vznikají signály o nových vlnových délkách. Toto lze popsat například následovně. Máme tři signály ω_i , ω_j , ω_k , které se šíří nelineárním médiem. Tyto signály však budou ve vzájemné interakci a díky tomu vzniknou signály s frekvencemi $\pm \omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$. Signál, který bude nejvíce ovlivněn, je možné zapsat následujícím vzorcem [28].

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k, i \neq k, j \neq k \quad (3.26)$$

Hlavním problémem je, že frekvenční kanály, které nově vznikly, se nacházejí blízko původním kanálům. Díky tomu pak může docházet k přeslechům. Na následujícím obrázku 28 (Obr. 28) je popsán případ pro dva signály a jejich následné znásobení vlivem čtyř vlnného směšování [28].



Obr. 28: a) Další frekvence generované prostřednictvím FWM částečně degenerované b) Příklad bez degenerovaných frekvencí [28]

S tímto jevem je nutné počítat hlavně u DWDM technologie, kde se vyskytují přenosové kanály velmi blízko u sebe [21], [28].

3.2.5. Vlastní fázová modulace

Nebo také Self Phase Modulation (SPM). Vzniká, když působí optický impuls sám na sebe. Při růstu nebo poklesu výkonu na hranách impulsu se mění fáze šíření. Vlivem toho dochází k tvarovému zkreslení a také rozšíření spektra impulsu. Signál je ovlivněn především nelinearitami prostředí v podobě lokálních změn indexu lomu. Díky tomu je narušeno původní šíření paprsku. Tuto závislost je možno vyjádřit [29]:

$$\varphi = 2\pi \cdot n \cdot \frac{L}{\lambda_0 A} \cdot P \quad (3.27)$$

kde n je index lomu, L délka dráhy, A průřez optického prostředí, vstupní výkon P a vlnová délka λ_0 .

Jev vlastní fázové modulace působí například ve WDM systémech, kde vlivem tohoto jevu vzniká vzájemná interference mezi přenosovými kanály [21].

3.2.6. Křížová fázová modulace

V angličtině známá pod názvem Cross Phase Modulation(XPM). V přenosovém médiu k tomuto jevu dochází vlivem interakce světelného paprsku s jiným světelným paprskem. Při tom je změněna optická fáze světelného paprsku. Křížová fázová modulace vzrůstá tehdy, jestli je zvyšován optický vstupní výkon nebo je zvyšována přenosová rychlost. U WDM systému může být tento jev snížen pomocí vhodného zvolení bitové rychlosti navzájem sousedících kanálů [2], [21].

3.2.7. Kerrův jev

Při tomto jevu dochází k lokální změně indexu lomu. Toto je zapříčiněno vysokou intenzitou elektromagnetického pole, což je tedy světlo v optickém vlákne. Lokální změnu indexu lomu je možné popsat následujícím vztahem [30], [31]:

$$n(\lambda, |E|^2) = n_0(\lambda) + n_2 |E|^2 \quad (3.28)$$

,kde $n(\lambda, |E|^2)$ je účinný index lomu, $n_0(\lambda)$ je index lomu pro lineární vlny a $n_2 |E|^2$ index lomu pro vlny s vyšší intenzitou. Z tohoto vzorce vyplývá, že změna indexu lomu Δn je úměrná druhé mocnině intenzity elektrického pole E . Kerrova konstanta, která může být kladná i záporná. Její hodnota závisí na stavu prostředí (skupenství), na teplotě (s rostoucí teplotou se zmenšuje) a na struktuře molekul prostředí. V tabulce 6 (Tab. 6) níže jsou uvedeny hodnoty Kerrovy konstanty pro některé látky [30], [31].

Látka	Kerrova konstanta k (m/V ²)
Nitrobenzen(C ₆ H ₅ NO ₂)	$2,4 \cdot 10^{-12}$
Sklo	$3 \cdot 10^{-16}$ až $2 \cdot 10^{-25}$
Voda	$4,4 \cdot 10^{-14}$

Tab. 6: Hodnoty Kerrovy konstanty pro některé látky[11]

3.3. Šumy

3.3.1. Výstřelový šum

Tento šum je způsoben díky tomu, že dochází k detekci pouze průměru z dopadajících fotonů a ne k detekci skutečného počtu dopadajících fotonů. Skutečný počet dopadajících fotonů není znám. Detekují se celá kvanta. Tyto kvanta obsahují pokaždé rozdílný počet fotonů. Díky tomu ani počet generovaných elektronů ve struktuře není znám. Proto při popisu výstřelového šumu je použito Poissonova rozdělení [32].

$$P(n) = \frac{e^{-n^*} \cdot (n^*)^n}{n!} \quad (3.29)$$

,kde n^* je střední hodnota počtu elektronů.

3.3.2. Tepelný šum

Tento šum je zapříčiněn odchylkami v počtu elektronů od průměrné hodnoty. Toto je způsobeno změnami teploty. S tímto šumem je nutné počítat, protože se nedá v praxi úplně odstranit. Řešením by bylo chlazení na téměř 0^0 K. Tento šum má Gaussovský průběh a lze ho popsat výkonovou spektrální hustotou [33]

$$\sigma_{i_{th}(t)}^2 = \frac{4k_B T}{R} \Delta\nu [-] \quad (3.30)$$

Kde $\sigma_{i_{th}(t)}^2$ představuje standartní odchylku proudu zdroje, k_B představuje Boltzmannovu konstantu ($J \cdot K^{-1}$), T představuje absolutní teplotu rezistoru udávanou v Kelvinech a kde je $\Delta\nu \cong \frac{1}{2t}$ šířka pásma detektoru. Ze vzorce je patrné, že spektrální hustota je konstantní. Tepelný šum je tedy bílým šumem stejně jako výstřelový šum.

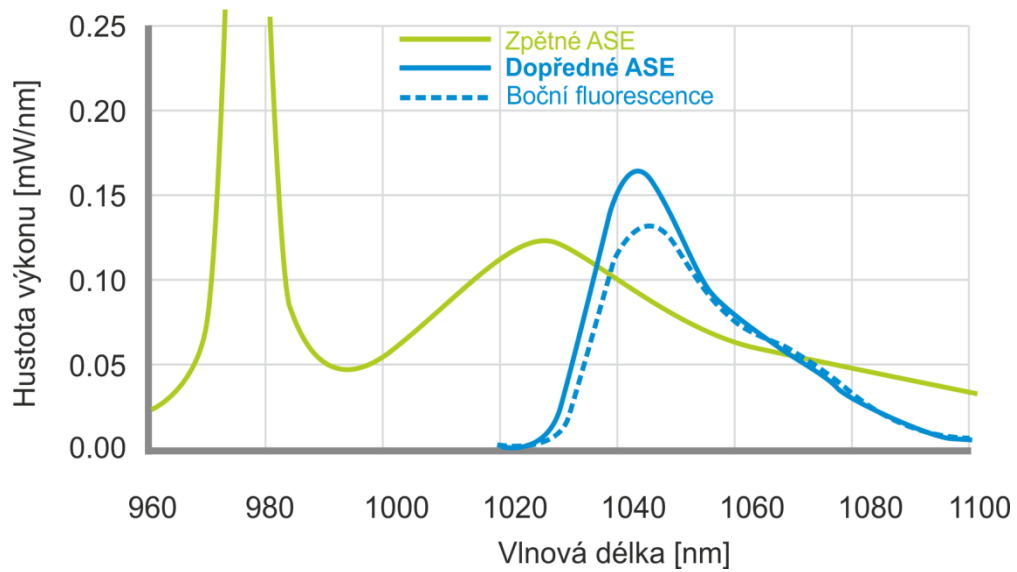
3.3.3. ASE

Tento šum je způsoben spontánní emisí. Při použití laserů, které mají vysoký výkon nebo pokud používáme vláknové zesilovače, je tento jev velice nežádoucí. Díky tomu jsou pak limitovány i výkony zesílení na 40-50 dB. Při nutnosti použití nebo dosažení větších výkonů je nutné zapojit zesilovače do kaskád. Tyto zesilovače jsou pak odděleny filtry.

ASE šum a jeho velikost není přímo závislá na parametrech jednovidového vlákna, jako jsou například numerická apertura anebo velikost jádra. Je však nutné zmínit, že ASE šum je závislý na počtech vidů ve vlákně.

Pokud usilujeme o potlačení ASE šumu, je možné použití například rozdílných délek vlákna nebo úrovní dopování. Je také možné použít jiné typy vláken.

ASE šum se mění v závislosti na směru dotování dopovaného vlákna. Na obrázku 29 (Obr. 29) níže, je znázorněn ASE šum při použití dopředného i zpětného čerpání [34].



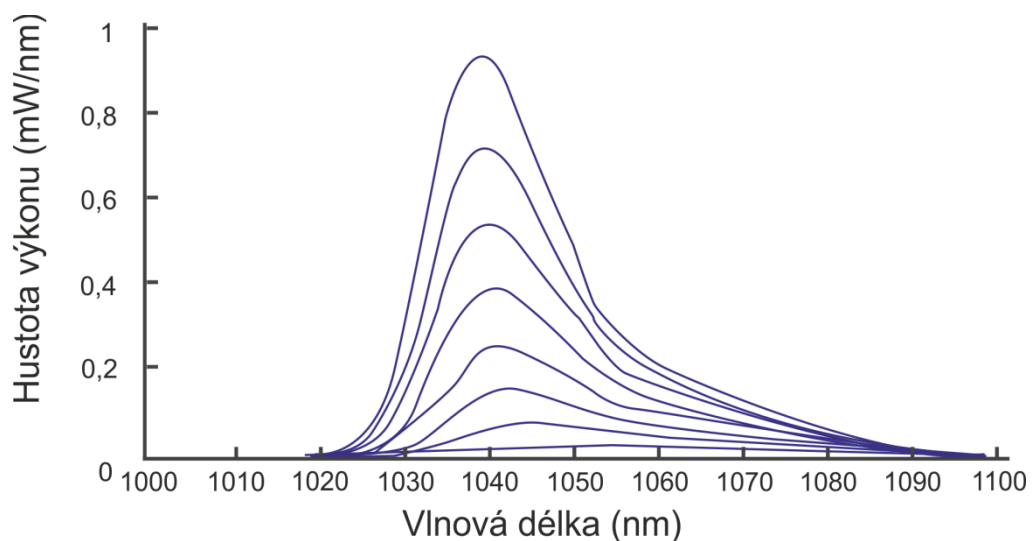
Obr. 29: Spektrum dopředného a zpětného ASE s použitým ytterbium dopovaným zesilovacím vláknem [34]

ASE šum u EDFA zesilovačů je možné vyjádřit vzorcem [34].

$$P_{ASE}^{out} \cong 2n_{sp}h\nu(G-1)\Delta B \quad (3.31)$$

Kde $n_{sp} = N_2/(N_2 - N_1)$ – činitel spontánní emise [-], h = Planckova konstanta [$m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$], ν = kmitočet optické nosné [Hz], G = zesílení EDFA zesilovače [-], ΔB = šířka optického pásma, ve kterém je měřen šum [Hz], šumový činitel EDFA je definován $F \approx 2n_{sp}$ a nejmenší teoretická hodnota je 2 dB. Obvykle se tato hodnota pohybuje od 4 do 5 dB [34].

Na dalším obrázku 30 (Obr. 30) je znázorněno spektrum pro zpětný ASE šum při různých výkonových úrovních pumpy.



Obr. 30: Spektrum zpětného ASE šumu při různých výkonových úrovních pumpy[34]

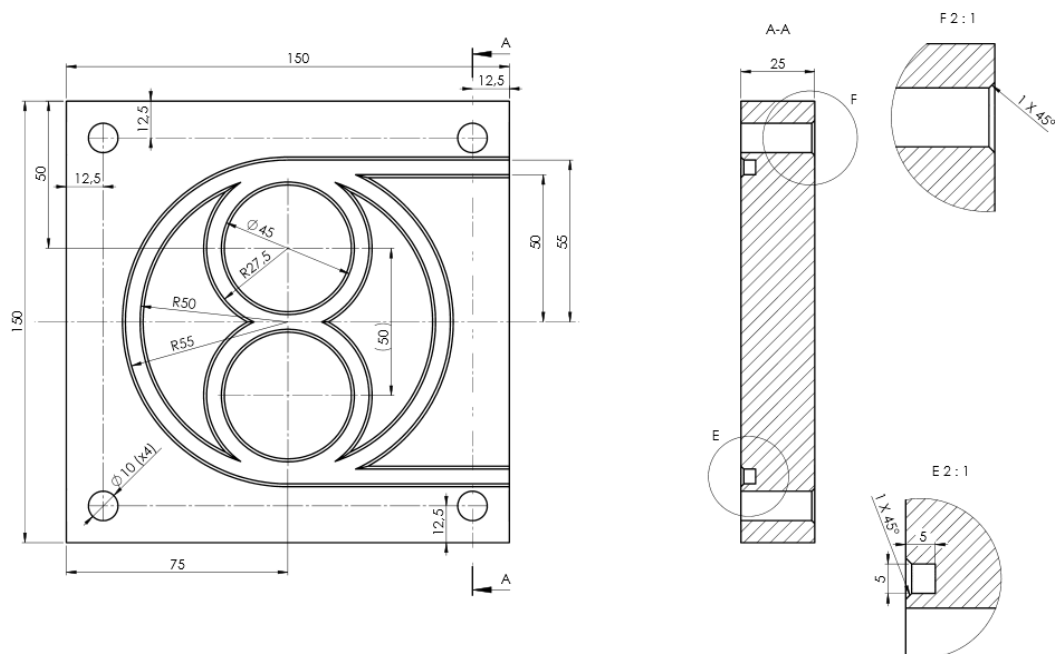
4. Návrh a příprava měřicího pracoviště

V předcházejících kapitolách byly detailně popsány základní fyzikální jevy, které je důležité znát pro pochopení funkce optických zesilovačů. Následně byly popsány i vlastnosti zesilovačů a komponent používaných v součinnosti se zesilovači. Jako poslední byly rozebrány negativní jevy, které ovlivňují jak samotný princip zesilování, tak i přenos v optických komunikacích.

V následujících kapitolách se práce více zaměřuje na praktické navržení a následné testování EDFA zesilovače podle bodů zadání. Nejprve je nutné sestavit pracoviště pro měření. Dále pak najít optimální délku zesilovacích vláken. Poté budou vlákna testována v závislosti na teplotě. Následně bude námi navržený EDFA zesilovač zapojen a testován v rámci WDM-PON sítě a výsledky budou porovnány s výsledky ze simulací z programu Optiwave OptiSystem 14. Jako poslední následuje vyhodnocení všech naměřených výsledků.

4.1. Sestavení měřicího pracoviště

Nejprve bylo nutné sestavit měřicí pracoviště. Jako podklad pro stavbu měřicího pracoviště byla použita deska firmy Thorlabs s rozměry 60x60 cm. Stavba na této desce byla zvolena z důvodu nutnosti celé měřicí pracoviště s EDFA zesilovačem také přenášet a optimalizovat sestavení pracoviště dle definovaných komponent. Z důvodu měření vlivu teploty na zesilovací vlákna byla na zakázku vyrobena speciálně navržená kostka z mědi. Měď jsme zvolili z toho důvodu, že zajišťuje velmi dobrou teplotní vodivost, která činí 393 W/mK. Rozměry kostky jsou zobrazeny na obrázku 31 (Obr. 31) níže. Originální výkres je možné nalézt v příloze A.



Obr. 31: Technický výkres měděné kostky použité pro měření

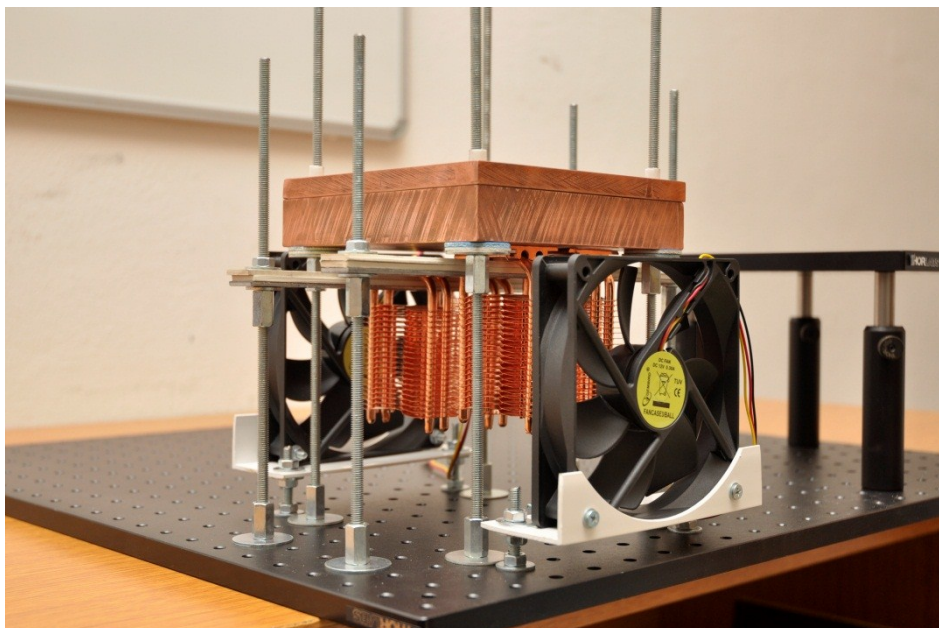
Při sestavování měřicího pracoviště bylo nutné vypořádat se s mnoha překážkami. Jednou z nich byl fakt, že erbiová vlákna budeme testovat při značně vysokých teplotách. Pro generování požadovaných teplot byly použity čtyři Peltierovy články. V následující tabulce 7 (Tab. 7) níže jsou specifikovány parametry použitých Peltierových článků použitých pro experimentální měření.

Výrobce	Vnější rozměry	Materiál	Maximální pracovní napětí	Maximální pracovní proud	Pracovní teplota	Maximální rozdíl teplot
Stonecold	40x40x3,8 mm	Al ₂ O ₃	14,9V	6,4	138 °C	68 °C

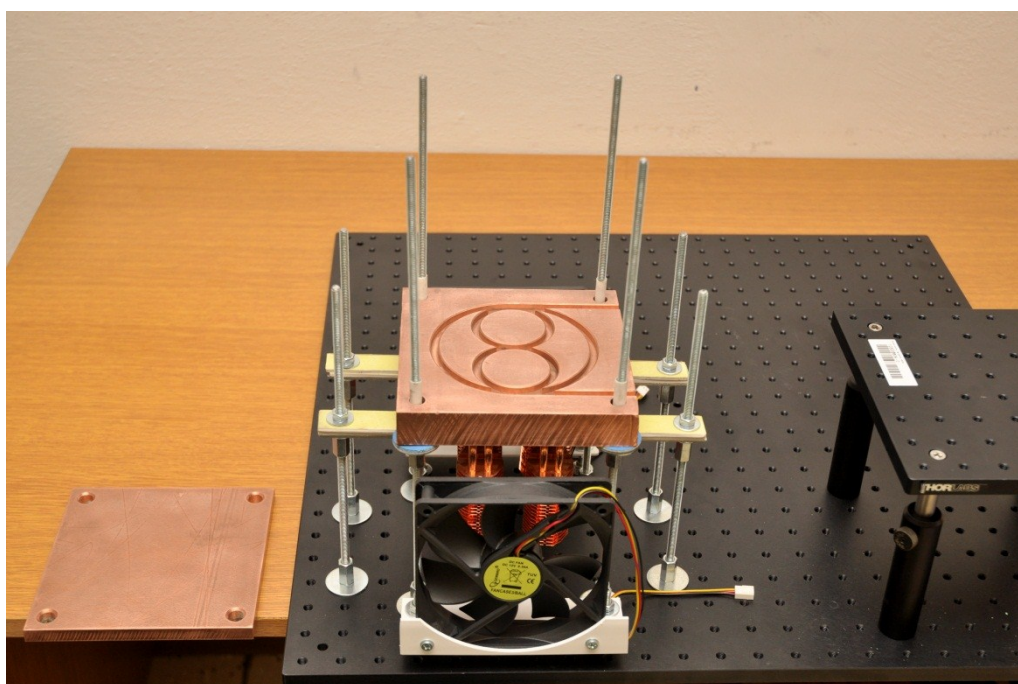
Tab. 7: Parametry použitých Peltierových článků

Z důvodu použití vysokých teplot a také kvůli objektivitě měření bylo nutné vymyslet celkové uchycení měděné kostky, ale i pasivních chladičů, tak aby se generované teplo nepřeneslo dále na systém uchycení kostky. Toto bylo vyřešeno tak, že byly použity přídavné hrazdy na uchycení pasivních chladičů a Peltierových článků a samostatné uchycení měděné kostky. Pro teplotní izolaci byl použit speciální topenářský bezazbestový izolační materiál Klingerit. Výrobce udává teplotní odolnost do 330 °C. Tato odolnost je pro naše měření dostatečná. Pro teplotní odizolování měděné kostky v místech, kde prochází železné tyče, byla použita silikonová bužírka s vnitřním opletem ze skelného vlákna. Teplotní rozsah této silikonové bužírky je -60 až 200 °C, což je pro naše měření opět dostačující. Přesné parametry použité silikonové bužírky je možné najít v příloze A.

Dále bylo nutné navrhnout přídavné chlazení pasivních chladičů. Toto bylo vyřešeno za pomoci standartních počítačových ventilátorů. Pro naše potřeby jsme vyrobili na míru plastové držáky pro uchycení a nastavení aktivních chladičů do požadované polohy, tak aby pomáhali vhodně odvádět přebytečné teplo nebo vlhkost z pasivních chladičů a také ze samotných Peltierových článků. Na dalších obrázcích 32 a 33 (Obr. 32 a Obr. 33) je vyobrazena část měřicího pracoviště, popisovaného výše, s uchycením a teplotní izolací měděné kostky a také je na obrázku vidět sestavený systém pro chlazení pasivních chladičů, které odvádějí přebytečné teplo od Peltierových článků a pasivních chladičů.

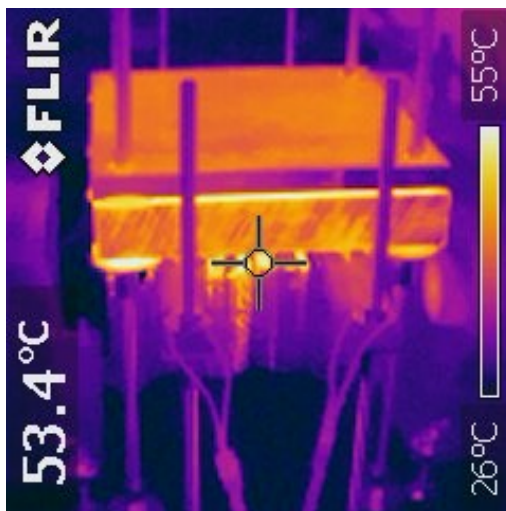


Obr. 32: Uchycení měděné kostky a systému chlazení (pohled z boku)



Obr. 33: Uchycení měděné kostky a systému chlazení (pohled shora)

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, zajištění odvodu přebytečného tepla a především vlhkosti je nezbytná podmínka pro správnou funkčnost Peltierových článků. Na následujícím obrázku 34 (Obr 34) níže, je vyfoceno měřicí pracoviště pomocí speciální termovizní kamery FLIR TG165, jejíž rozsah je -25 C až +380 C. Detailní specifikace této termovizní kamery FLIR TG165 je uvedena v příloze A.



Obr. 34: Měření a ověření teplotní izolace pomocí termovizní kamery FLIR TG165

Na obrázku 34 (Obr. 34) lze velice dobře vidět, že nedochází ke ztrátám tepla přes uchycení měděné kostky. Dále také můžeme pozorovat, že měděná kostka a její nahřívání funguje rovnoměrně a nedochází tedy k velkým odchylkám, co se týče teploty.

4.1.1. Použití systému DTS pro měření teploty uvnitř měděné kostky

Při sestavování měřicího pracoviště a hlavně pro následná měření vlivu teploty na experimentální Erbiem dopovaná vlákna bylo nutné zajistit měření teploty uvnitř měděné kostky. Pro tyto účely byl zvolen způsob měření teploty pomocí systému DTS.

DTS neboli (Distributed Temperature System) jsou optovláknové systémy, které dokáží měřit teplotu nebo napětí s pomocí optického vlákna. Systém DTS využívá optické vlákno tak jako by to bylo několik stovek nebo tisíc senzorů, které po náležitém zpracování, poskytují informace o teplotním nebo i tlakovém profilu podél optického vlákna.

Fungování DTS systémů je založena na principu, že je do optického vlákna vyslán světelný impuls o vlnové délce 1064 nm a velikosti menší než je 1 mW a době 10 ns a jeho specifická část se vlivem nelineárního rozptylu v optickém vlákne navrací zpět na detektor systému DTS. U optovláknových distribuovaných systémů se nejčastěji využívá optická reflektometrie v časové oblasti jako například OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) nebo OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry). Díky nelineárním jevům jako je Ramanův nebo Brillouinův rozptyl, se pak vrací část světelného impulsu na detektor. DTS systémy se tak dělí na ty, které pracují s Ramanovým rozptylem a na ty, které využívají k detekování Brillouinův rozptyl [37].

DTS systémy pracující s Ramanovým stimulovaným rozptylem a používají mnohavidové optické vlákno. Jeho standardní parametry jsou průměr jádra 50 μm a průměr pláště 125 μm . Je možné použít například i vlákno s průměrem jádra 62,5 μm a pláštěm 125 μm , dle ITU G. 651.1 s velkou hodnotou numerické apertury. Toto je výhodné hlavně z hlediska maximalizování vedené intenzity zpětně odraženého světla. Je to z toho důvodu, že intenzita zpětně odraženého Ramanova rozptylu je poměrně nízká. Dosah DTS systémů založených na Ramanově rozptylu je omezen přibližně na 8 - 10 km. Je to zapříčiněno vyšší útlumovou charakteristikou mnohavidového vlákna [37].

DTS systém tedy poskytuje spoustu výhod a předností, jak je tomu i u optických vláken. Pro naše měření je však hlavní, že s pomocí DTS systému jsme schopni okamžitě rozpoznat změny teploty uvnitř měděné kostky a okamžitě na ně reagovat přenastavením napájení Peltierových článků a následným snížením nebo zvýšením jejich teploty. Díky tomu je možné udržet teplotu po celou dobu pokud možno neměnnou, což je důležité pro dosažení nejvyšší přesnosti měření.

Pro naše měření jsme použili DTS systém od firmy SensorNet z Velké Británie. Toto zařízení nese označení Sentinel DTS-LR a je zobrazeno na obrázku 35 (Obr. 35). Toto zařízení pracuje na principu Ramanova rozptylu.



Obr. 35: DTS systém Sentinel DTS-LR

Parametry tohoto zařízení jsou uvedeny tabulce 8 (Tab. 8). Kompletní manuál k tomuto zařízení se nachází v příloze A, kde jsou uloženy všechny manuály.

Typ/Označení zařízení	Sentinel DTS-LR
Výrobce	SensorNet
Přesnost měření teploty	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
Rozlišení	$\geq 0,01^{\circ}\text{C}$
Interval měření	15 – 1800 s
Krok (délka)	1 m

Tab. 8: Parametry DTS systému Sentinel DTS-LR

Při reálném měření se nám i díky použití DTS systému Sentinel DTS-LR podařilo dosáhnout odchylky teplot jen v rozmezí $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ od teploty dané pro aktuální měření, což bylo více než dostačující. Délka kroku při měření byla 1m.

4.2. Použité optické komponenty

V této části jsou uvedeny použité optické komponenty a jejich parametry. Mezi použité optické komponenty patří spojovač, pumpovací lasery a experimentální Erbiem dopované vlákna.

4.2.1. Pumpovací (čerpací) lasery

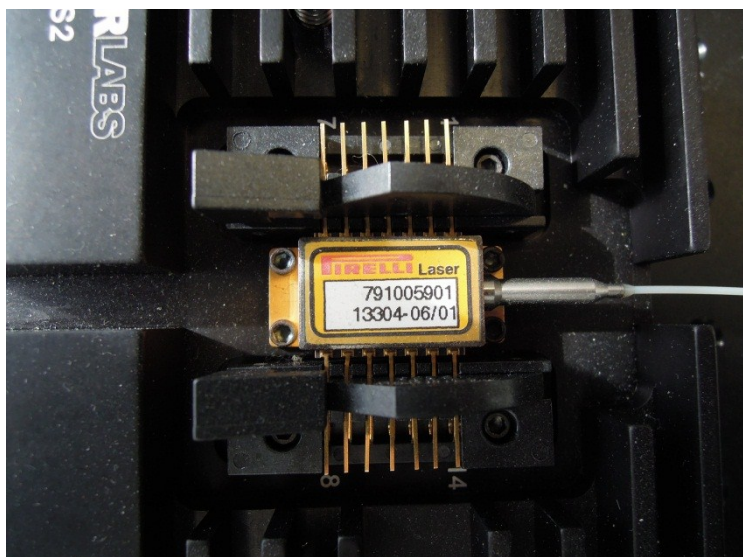
Jako pumpovací (čerpací) lasery byly vybrány dva níže více popsané lasery. Důvodem pro zvolení dvou pumpovacích (čerpacích) laserů byl fakt, že první laser značky Pirelli E2-980 byl schopný vyvinout pumpovací výkon jen do 125 mW na vlnové délce 980 nm. Toto bylo pro naše měření nedostačující a tak jsme použili druhý laser pro vyvinutí většího pumpovacího výkonu z důvodu většího vybuzení Erbiem dopovaného vlákna. Následně pak také kvůli dosažení většího zesílení. Tento druhý laser byl používán pro vyvinutí pumpovacích výkonů od 125 mW do 200 mW opět na vlnové délce 980 nm.

Jak již bylo zmíněno výše, jako první pumpovací (čerpací) laser pro rozsah výkonu pumpy od 0 mW do 125 mW byl zvolen laser od firmy Pirelli. Pro uchycení laseru byl zvolen adaptér od firmy Thorlabs LM14S2. Specifické parametry laseru jsou zapsány v následující tabulce 9 (Tab. 9).

Parametry měřené při teplotě 25°C				
Výkon	Prahový proud	Proud v propustném směru	Smyčkový proud	Maximální vlnová délka
125 mW	20,40 mA	21,56 mA	258 mA	976,6 nm

Tab. 9: Parametry použitého pumpovacího laseru Pirelli E2-980

Manuál k tomuto laseru je umístěn v příloze A, kde jsou uloženy všechny manuály. Laser společně s adaptérem je vyfocen na obrázku 36 (Obr. 36) níže.



Obr. 36: Pumpovací laser a jeho uchycení v adaptéru Thorlabs LM14S2

Pro napájení tohoto laseru jsme použili přístroje Thorlabs LDC205 C, který slouží pro řízení elektrického proudu a Thorlabs TED200 C, který slouží pro nastavení a kontrolu teploty.

Jako druhý pumpovací (čerpací) laser byl použit laser firmy Oclaro s označením LC96A74P-20R. Tento laser byl použit pro generování pumpovacích výkonů od 125 mW do 200 mW.

Pro napájení tohoto laseru jsme použili přístroje Thorlabs LDC205 C, který slouží pro řízení elektrického proudu a Thorlabs TED200 C, který slouží pro nastavení a kontrolu teploty.

Parametry laseru LC96A74P-20R jsou uvedeny v tabulce 10 (Tab. 10)

Parametry měřené při teplotě 25 °C				
Výkon	Prahový proud	Proud v propustném směru	Smyčkový proud	Maximální vlnová délka
400 mW	55 mA	1200 mA	-	974 nm

Tab. 10: Parametry použitého pumpovacího laseru Oclaro LC96A74P-20R

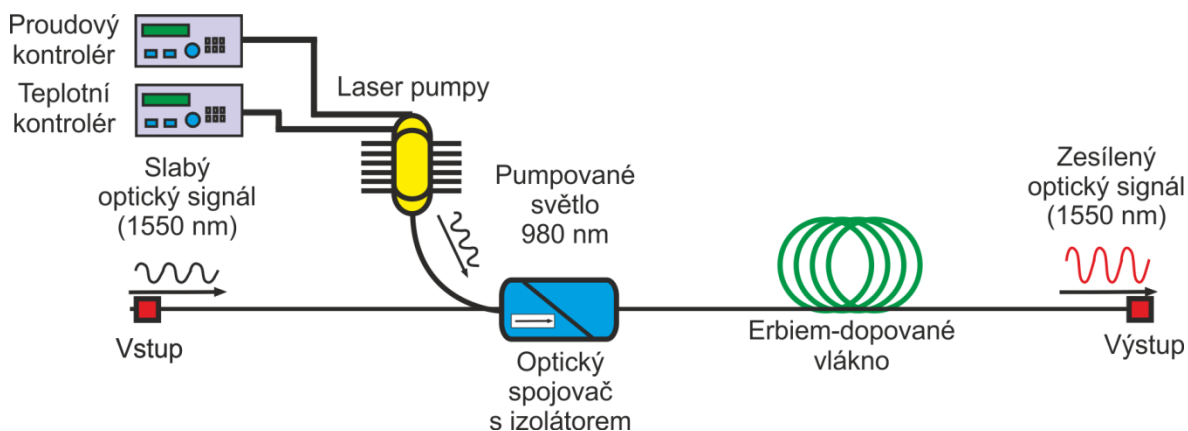
4.2.2. WDM slučovač

Další použitou komponentou v zapojení byl WDM spojovač. Pro naše zapojení EDFA zesilovače jsme použili jeden WDM spojovač s integrovaným izolátorem. Jeho parametry jsou zapsány v tabulce 11 (Tab. 11) níže.

Provozní vlnová délka (nm)	980/1550
Vložný útlum při 980 nm (dB)	0,45
Vložný útlum při 1550 nm (dB)	0,44
Minimální izolace při 980 nm (dB)	65
Minimální izolace při 1550 (dB)	30
Směrovost (dB)	59
PDL (dB)	0,05
TDL	0,12
Útlum odrazu (dB)	53
Typ konektoru	SC/APC
Provozní teplota (°C)	0~+70

Tab. 11: Parametry WDM spojovače s integrovaným izolátorem

Na dalším obrázku 37 (Obr. 37) je pak znázorněno umístění spojovače s integrovaným izolátorem v rámci celkového zapojení EDFA zesilovače.



Obr. 37: Umístění spojovače s integrovaným izolátorem v rámci zapojení EDFA zesilovače

4.2.3. Volba testovacích Erbiem dopovaných vláken

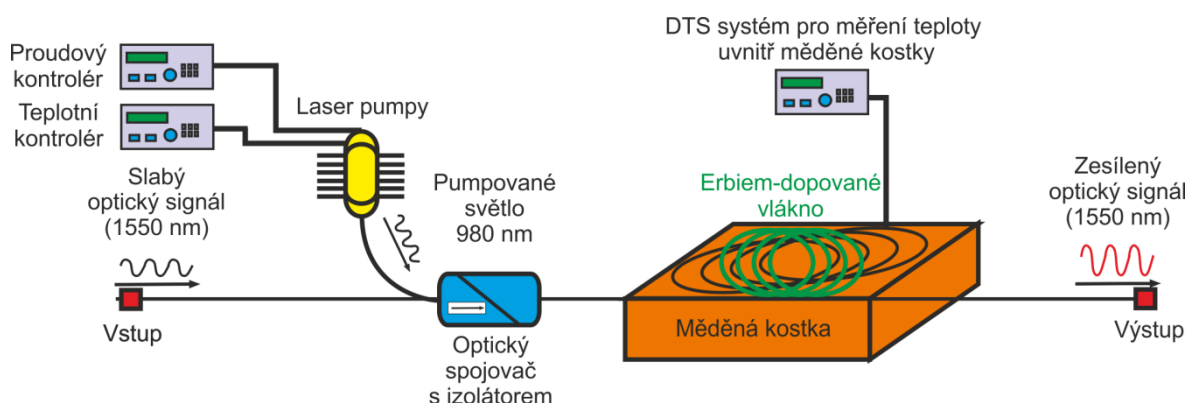
Pro samotné testování jsme měli k dispozici 4 experimentální, Erbiem dopovaná zesilovací vlákna poslaná speciálně pro účely našeho měření z výzkumného centra pro optická vlákna z Kalkaty v Indii od Dr. Dhara. Přesný název tohoto výzkumného centra zní: „Fibre Optics & Photonics Division Central Glass & Ceramic Research Institute“. V následující tabulce 12 (Tab. 12) jsou uvedeny dostupné parametry těchto vláken. Bohužel další parametry nebylo možné zjistit z důvodu, že se jedná o experimentální vlákna.

ID vlákna	Složení pláště	Složení jádra	Průměr jádra	Numerická apertura (NA)	Útlum při 980 nm (dB/m)	Útlum při 1530 nm (dB/m)	Optimální délka (m)
SAE-1	SiO ₂ -P ₂ O ₅ -F	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Er ₂ O ₃	5,2	0,15	~10	~20	~10-12
SAE-2	SiO ₂ -P ₂ O ₅ -F	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Er ₂ O ₃	4,5	0,19	~15	~30	~10-12
SGAE-1	SiO ₂ -P ₂ O ₅ -F	SiO ₂ -GeO ₂ Al ₂ O ₃ -Er ₂ O ₃	3,9	0,20	~5	~10	~15
SGAE-2	SiO ₂ -F	SiO ₂ -GeO ₂ Al ₂ O ₃ -Er ₂ O ₃	5,0	0,17	~6	~12	~15

Tab. 12: Parametry Erbiem dopovaných vláken

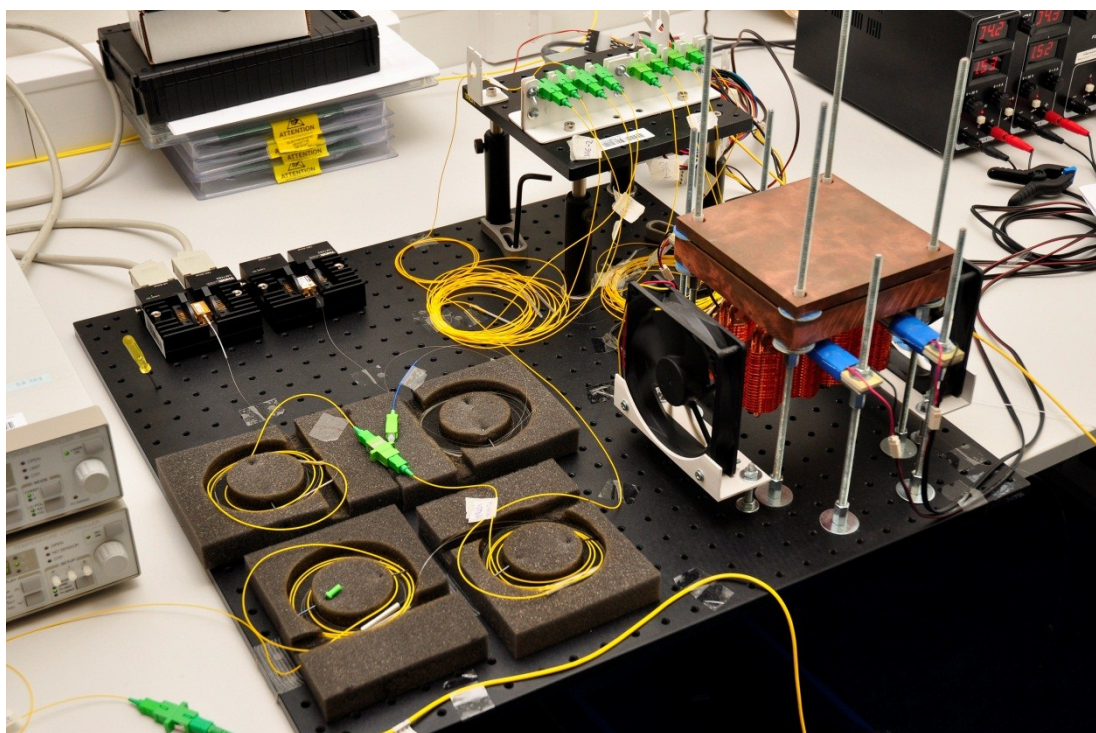
4.3. Kompletní zapojení EDFA zesilovače

Pro zapojení Erbium dopovaného zesilovače bylo použito standartní schéma pro zapojení EDFA zesilovače. Na následujícím obrázku 38 (Obr 38) níže, je uvedeno použité zapojení pro naše měření i s naznačeným umístěním měděné kostky a také DTS systému, který byl použit pro kontrolu teploty uvnitř měděné kostky.



Obr. 38: Schéma kompletního zapojení navrženého EDFA zesilovače

Kompletní zapojení navrženého Erbiového zesilovače bylo poté umístěno na již zmíněnou desku Thorlabs a zakomponováno do celkového systému se všemi součástmi navržených pro naše měření. Toto řešení poskytuje ideální podmínky pro všechna zadaná měření a zároveň splňuje podmínku na možnost přenášení a tedy mobilitu celého měřicího pracoviště. Kompletní zapojení je vyfoceno na následujícím obrázku 39 (Obr. 39) níže.



Obr. 39: Kompletní zapojení měřicího pracoviště (pohled zepředu)

5. Hledání ideální délky Erbiového vlákna vzhledem k maximálnímu zesílení

Po sestavení měřicího pracoviště následovalo první významné měření. Pro všechna čtyři experimentální zesilovací vlákna bylo nutné nalézt ideální délku odpovídající maximálnímu zesílení.

Jeden ze standardních postupů pro vyřešení tohoto problému je ve zkratce následující. Zesilovací vlákno se zkracuje obvykle po metru a po každém zkrácení se proměří výkon na výstupu vlákna. Takto lze najít optimální délku, při které Erbiem dopované vlákno poskytuje největší zesílení. Jistá nevýhoda tkví v tom, že metrové kousky, které jsme odstříhli, už bohužel nemůžeme smysluplně využít. Tímto se tato metoda stává velice nákladnou a mnohdy i nepraktickou, uvažíme-li cenu Erbiem dopovaného zesilovacího vlákna.

Při řešení této úlohy jsme však nechtěli a ani nemohli použít tento destruktivní přístup. Jak již bylo zmíněno, testování probíhalo se speciálními experimentálními vlákny a bylo tedy nutné najít řešení, při kterém zjistíme ideální délku vlákna a pak ho zkrátíme už přesně na tuto ideální délku. Zbylé metry Erbiem dopovaného vlákna můžeme použít k dalším pokusům nebo k dalšímu použití jako zesilovací vlákno.

Pro řešení této úlohy byl použit identifikátor provozu v optických vláknech s měřičem výkonu od firmy FUJIKURA s označením FID-20R. Přístroj FUJIKURA FIN-20R je vyobrazen na následujícím obrázku 40 (Obr. 40).



Obr. 40: Identifikátor provozu v optických vláknech s měřičem výkonu od firmy FUJIKURA s označením FID-20R

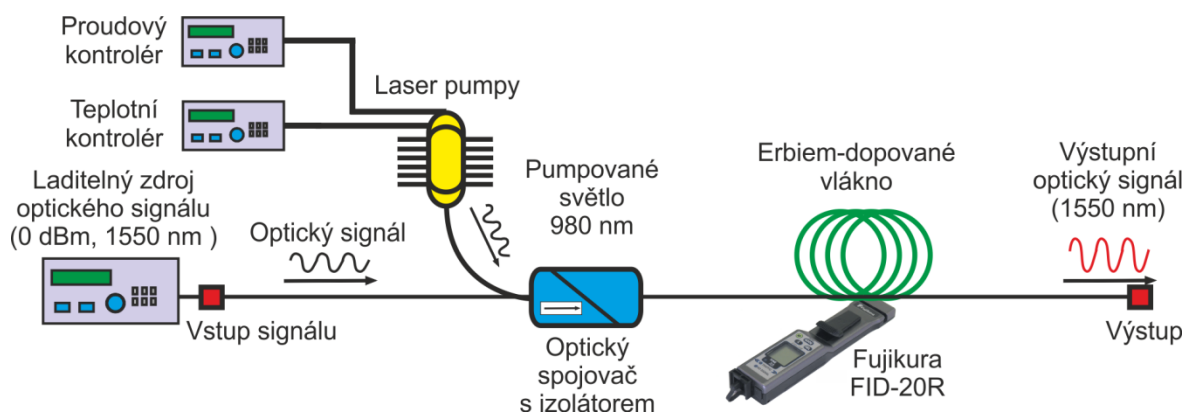
Tento měřicí přístroj je schopen určit výkon optického signálu pro 1310 nm a pro 1550 nm v konkrétním bodě a to bez poškození samotného vlákna. Kompletní specifikace tohoto přístroje je uvedena v příloze A. I když tento přístroj není primárně určen na tento typ úlohy, tedy hledání maximálního zesílení v Erbiem dopovaných vláknech, po sérii zkoušek v laboratoři, které jsme provedli, bylo zjištěno, že tento postup může být bez problému použit pro řešení této úlohy.

Při samotném měření byl jako zdroj vstupního signálu použit laditelný laser EXFO 2100-FLS s výkonem 0 dBm a vlnovou délkou 1550 nm. Jeho kompletní parametry lze nalézt v příloze A.

Samotné měření probíhalo tak, že se vlákno rovně položilo na zem. Postupně se zvyšoval výkon pumpy, od 0 mW až po 200 mW a to vždy po kroku 25 mW. Dále byl na každém metru pomocí FID-20R změřen výkon desetkrát a těchto deset hodnot bylo zprůměrováno a výsledná hodnota byla použita do finálního grafu.

Toto průměrování bylo nutné z hlediska zajištění objektivitu měření, jelikož hodnoty naměřené přístrojem FUJIKURA byly ovlivnitelné různými faktory, jako například správným umístěním vlákna do přístroje, správným ohybem vlákna, světelnými podmínkami v místě měření atd.

Na obrázku 41 (Obr. 41) je uvedeno experimentální schéma pro dané měření.



Obr. 41: Schéma zapojení při hledání optimální délky erbiem dopovaného vlákna vzhledem k maximálnímu zesílení

Dále jsou uvedeny grafy z měření. V grafech jsou přehledně vidět naměřené hodnoty při výkonu pumpy 100 mW a 200 mW. Pro nalezení optimální délky bylo nezbytně nutné nad naměřenými daty provést polynomickou regresi. Polynomická regrese představuje proložení (aproximaci) zadaných hodnot polynomem. Koeficienty hledaného polynomu jsou pomocí metody hledání nejmenších čtverců vypočteny tak, aby součet druhých mocnin odchylek původních hodnot od získaného polynomu byl minimální. Obecná rovnice polynomické regrese je následující.

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \dots + b_nx^n \quad (5.1)$$

Kde b_i jsou neznámé parametry, které je potřeba určit a n je stupeň polynomu. V našem případě hledání optimální délky byla použita polynomická funkce 6. Řádu. Výsledná optimální délka byla určena při maximálním výkonu pumpy, což bylo 200 mW.

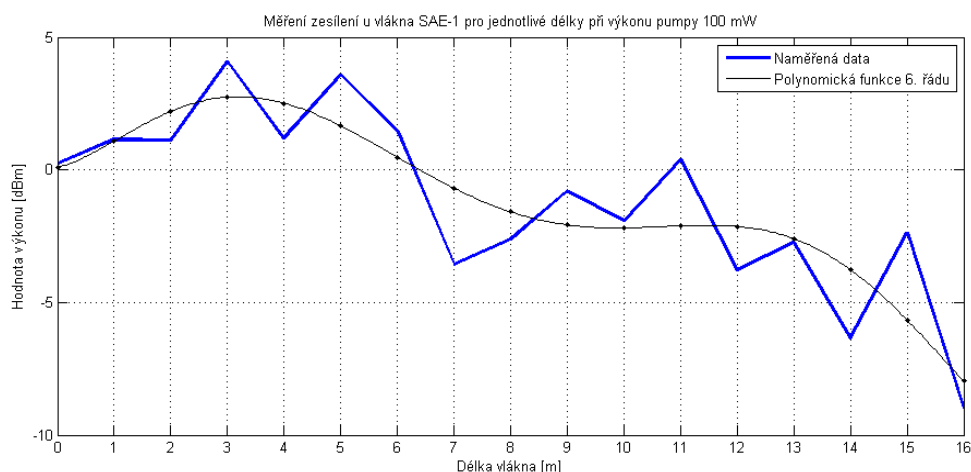
Následně je uváděna i hodnota spolehlivosti R neboli koeficient determinace, který je před odmocněním vypočítán podle vzorce.

$$R^2 = \frac{S_{reg}}{S_{yy}} \quad (5.2)$$

Kde S_{reg} je regresní součet čtverců odchylek predikcí od průměru a S_{yy} je celkový součet čtverců odchylek dat od průměru.

Níže jsou uváděny grafy a jejich popisy pro výkon pumpy 100 mW a 200 mW. Všechny naměřené hodnoty a grafy jsou pak uvedeny v příloze B.

5.1. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-1

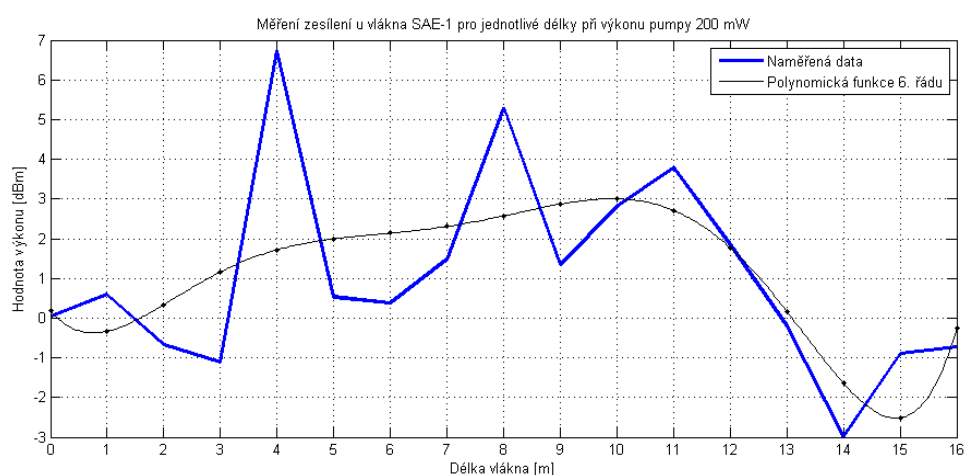


Obr. 42: Měření zesílení u vlákna SAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW

Jako první pro testování bylo zvoleno experimentální zesilovací vlákno SAE-1. V prvním grafu (Obr. 42) je možné vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna při výkonu pumpy 100 mW. Na obrázku je možné vidět, že největší nárůst nastává při délce vlákna 3 metry, kde zesilovací výkon dosahuje hodnoty přibližně 2,5 dBm a pak výkon pomalu klesá. Samozřejmě optimální délka v tomto případě není délka vlákna 3 metry a je tedy třeba dané Erbiem dopované vlákno více vybudit větším pumpovacím výkonem. Graf naměřených hodnot byl dále proložen polynomičskou funkcí 6. řádu, kde rovnice této funkce je následující.

$$y = 5^{-5}x^6 - 0,0027x^5 + 0,0557x^4 - 0,5178x^3 + 2,0084x^2 - 2,1655x + 0,7164 \quad (5.2)$$

A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci $R = 0,7394$.



Obr. 43: Měření zesílení u vlákna SAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 10. metru)

Na obrázku 43 (Obr. 43) je možné vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna při výkonu pumpy 200 mW. Je možné si všimnout, že v grafu jsou významné odchylky od

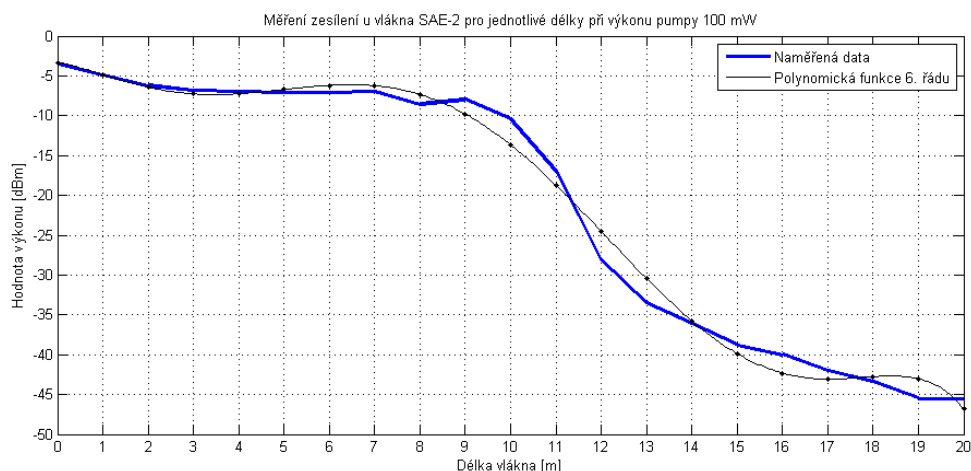
průměrných hodnot a to především na 4. a 8. metru. Tento jev mohl být nejpravděpodobněji zapříčiněn větším zesílením v této délce vlákna. Graf je opět proložen polynomiální funkcí 6. řádu. Její rovnice je následující.

$$y = 8^{-5}x^6 - 0,0038x^5 + 0,0734x^4 - 0,6891x^3 + 3,217x^2 - 6,3386x + 3,9314 \quad (5.3)$$

A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci R= 0,4407.

Z polynomiální funkce můžeme sledovat, že nárůst zesílení výkonu v Erbiem dopovaném vlákne SAE-1 se plynule zvyšuje až do 10. metru a pak prudce klesá. Největšího zesílení dosahuje Erbiem dopované vlákno SAE-1 na 10. metru při výkonu pumpy 200 mW. Zesílení na 10. metru dosahuje hodnoty 3 dBm, což představuje dvojnásobné zesílení. Při porovnání námi naměřených hodnot optimální délky vlákna SAE-1, tedy 10 metrů, s hodnotami, které udává výrobce (10-12 metrů) je možné konstatovat, že jsme pomocí našeho hledání optimální délky s pomocí přístroje Fujikura FID-20R dospěli k výsledkům, které jsou v toleranci s hodnotami udávaných výrobcem. Vláknem bylo tedy zkráceno na 10 metrů.

5.2. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-2

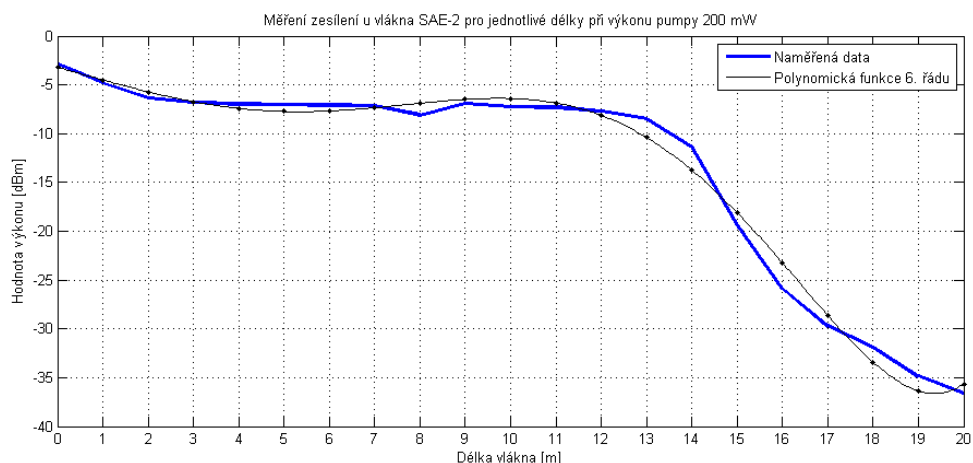


Obr. 44: Měření zesílení u vlákna SAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW

Jako další bylo pro testování zvoleno experimentální zesilovací vlákno SAE-2. V prvním grafu (Obr. 44) je možné vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna při výkonu pumpy 100 mW. V grafu nejsou příliš velké odchylky hodnot. Naměřené hodnoty se pohybují kolem -5 dBm do délky 8 metrů a pak následuje strmý propad výkonu. Hodnota -5 dBm ukazuje na fakt, že vlákno při výkonu pumpy 100 mW signál na vlnové délce 1550 nm spíše utlumuje a to více než o polovinu původní hodnoty (0 dBm). To je do velké míry zapříčiněno vlastními parametry vlákna SAE-2. Kde vlastní útlum vlákna pro vlnovou délku 980 nm je přibližně 15 dB a pro vlnovou délku 1550 nm je vlastní útlum vlákna dokonce 30 dB. Je tedy nutné toto vlákno SAE-2 vybudit větším výkonem pumpy. Graf naměřených hodnot byl proložen polynomickou funkcí 6. řádu, kde rovnice této funkce je následující.

$$y = -5^{-5}x^6 + 0,0031x^5 - 0,0669x^4 + 0,6087x^3 - 2,2464x^2 + 1,8201x - 3,4191 \quad (5.4)$$

A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci R= 0,9892.



Obr. 45: Měření zesílení u vlákna SAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 10. metru)

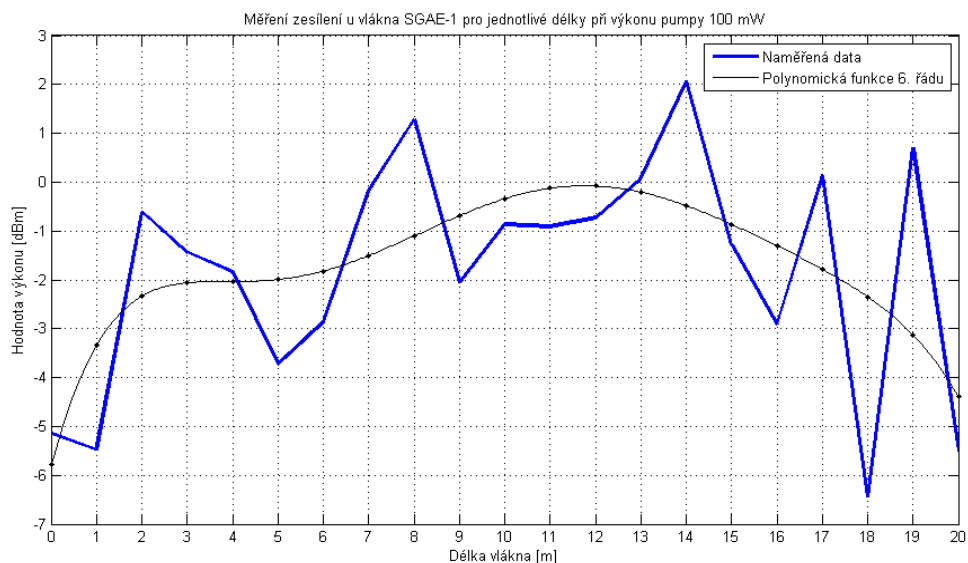
Na obrázku 45 (Obr. 45) je možné vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna SAE-2 při výkonu pumpy 200 mW. V grafu nejsou opět příliš velké odchylky hodnot. Naměřené hodnoty se pohybují pod -5 dBm do délky 10 metrů a pak následuje opět strmý propad výkonu jako při výkonu pumpy 100 mW. Hodnota pod -5 dBm ukazuje na fakt, že vlákno SAE-2 ani při výkonu pumpy 200 mW není schopno vyvinout dostatečný zesilovací výkon a bylo by tedy nutné vyvinout ještě větší pumpovací výkon, tak aby bylo dosaženo adekvátního zesílení. V případě našeho měření jsme však výkon pumpy dále nezvyšovali a pracovali s tímto vláknem při maximálním výkonu pumpy 200 mW. Graf naměřených hodnot byl také proložen polynomicou funkcí 6. řádu, kde rovnice této funkce je následující.

$$y = 9^{-6}x^6 - 0,0003x^5 + 0,002x^4 + 0,0226x^3 - 0,1274x^2 - 1,0775x - 2,045 \quad (5.5)$$

A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci $R = 0,9881$.

Po proložení daných hodnot polynomicou funkcí 6. řádu je vidět, že k rapidnímu propadu hodnoty zesílení dochází na 11. metru. Proto bylo vlákno zkráceno na 10 metru. Tato námi nalezená ideální délka se shoduje s ideální délkou udávanou výrobcem, který udává délku 10-12 metrů.

5.3. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-1

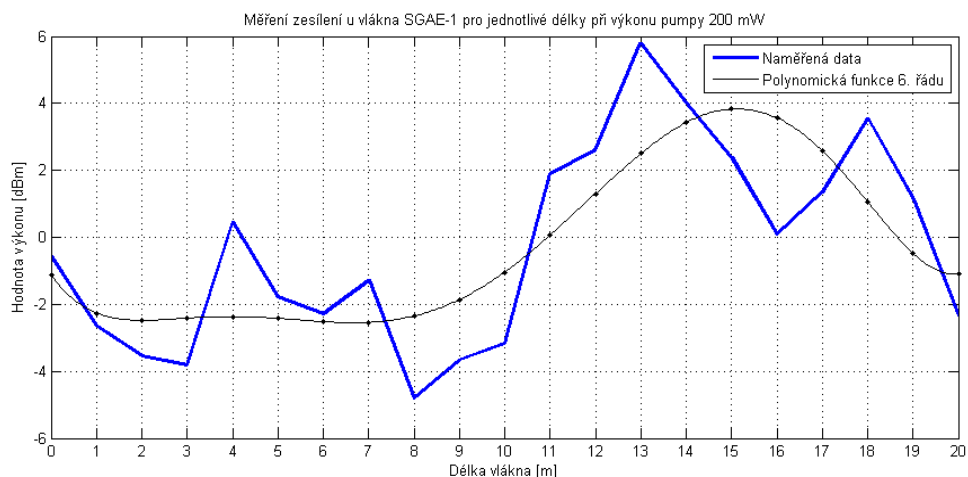


Obr. 46: Měření zesílení u vlákna SGAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW

Jako další bylo pro testování zvoleno experimentální zesilovací vlákno SGAE-1. V prvním grafu (Obr. 46) je možné vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna při výkonu pumpy 100 mW. V grafu je možné vidět velké odchylky naměřených hodnot. Toto může být opět zapříčiněno větším zesílením v dané délce vlákna. Z grafu je také patrné, že při výkonu pumpy 100 mW Erbiem dopované vlákno SGAE-1 spíše signál na vlnové délce 1550 nm utlumuje. Proto je nutné vyvinout větší výkon pumpy. Největšího výkonu (0 dBm) dosahuje toto vlákno při délce vlákna 12 metru a poté se hodnota výkonu prudce snižuje. Tento trend je více patrný, když se graf naměřených hodnot proloží polynomickou funkcí 6. řádu, kde rovnice této funkce je následující.

$$y = -1^{-5}x^6 + 0,0007x^5 - 0,0208x^4 + 0,2871x^3 - 1,9957x^2 + 6,723x - 10,78 \quad (5.6)$$

A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci R= 0,3815.



Obr. 47: Měření zesílení u vlákna SGAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 15. metru)

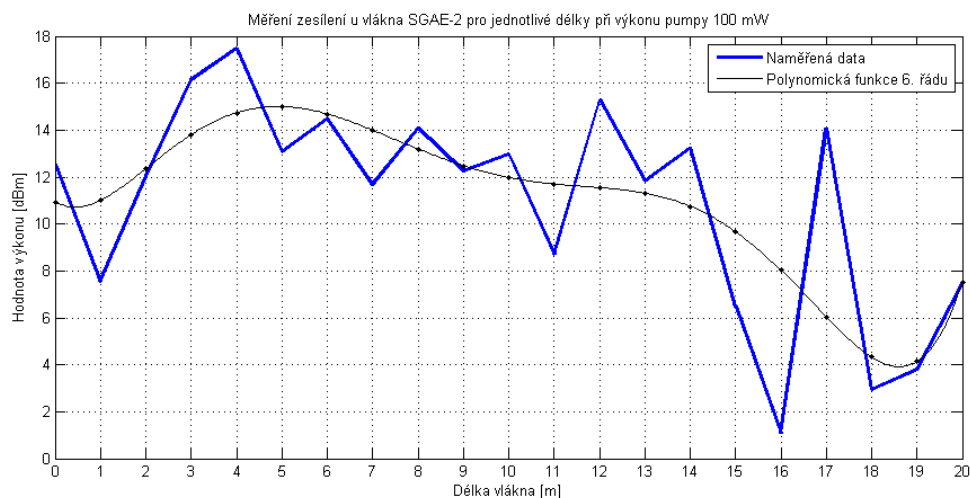
Na obrázku 47 (Obr. 47) je vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna SGAE-1 při výkonu pumpy 200 mW. V grafu je opět možné vidět velké odchylky naměřených hodnot. Toto může být opět zapříčiněno větším zesílením v dané délce vlákna. V tomto případě, kdy je výkon pumpy 200 mW, je však patrný útlum signálu až do 8. metru délky vlákna, kdy se hodnoty zesílení pohybují pod hodnotou -2 dBm. Od 8. metru můžeme pozorovat prudký nárůst zesílení až do 15. metru, kdy zesílení dosahuje hodnoty přibližně 4 dBm, což představuje 2,5 krát větší zesílení vstupního signálu. Tento trend je opět více patrný, když se graf naměřených hodnot proloží polynomickou funkcí 6. řádu kde rovnice této funkce je následující.

$$y = 2^{-5}x^6 - 0,0013x^5 + 0,0296x^4 - 0,3254x^3 + 1,7752x^2 - 4,5783x + 1,9621 \quad (5.7)$$

A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci R= 0,6061.

Po proložení daných hodnot polynomickou funkcí 6. řádu je vidět, že k maximálnímu zesílení dochází při délce vlákna 15 metrů. Proto bylo vlákno zkráceno na 15. metru. Tato námi nalezená ideální délka se shoduje s ideální délkou udávanou výrobcem, který udává délku přibližně 15 metrů.

5.4. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-2

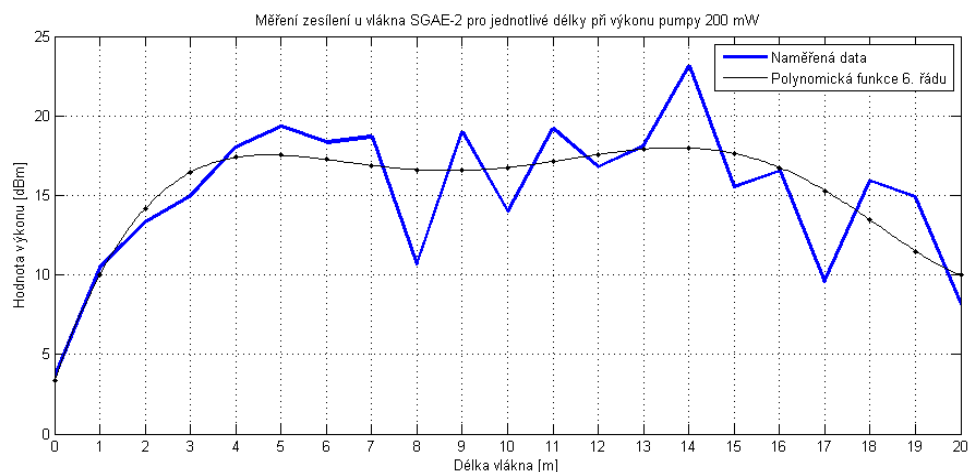


Obr. 48: Měření zesílení u vlákna SGAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW

Jako poslední bylo pro testování a hledání ideální délky zvoleno experimentální zesilovací vlákno SGAE-2. V prvním grafu (Obr. 48) je možné vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna při výkonu pumpy 100 mW. V grafu můžeme pozorovat různé odchylky, které mohou být opět zapříčiněny různou mírou zesílení v dané délce zesilovacího vlákna. Na první pohled je však patrné velké zesílení a průměrná hodnota 12 dBm, což je více než 10 krát větší zesílení oproti vstupnímu signálu a to už při výkonu pumpy 100 mW. Na počátku je vidět nárůst ještě větší a to až na hodnotu 15 dBm. Tento nárůst trvá až do 5 metru a pak postupně pozvolna klesá. Tento trend je více patrný, když se graf naměřených hodnot proloží polynomickou funkcí 6. řádu, kde rovnice této funkce je následující.

$$y = 4^{-5}x^6 - 0,0022x^5 + 0,0528x^4 - 0,5932x^3 + 3,0638x^2 - 5,6941x + 14,11 \quad (5.8)$$

A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci R=0,5206.



Obr. 49: Měření zesílení u vlákna SGAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 14. metru)

Na obrázku 49 (Obr. 49) je vidět jednotlivé úrovně výkonu na každém metru vlákna SGAE-2 při výkonu pumpy 200 mW. V grafu je opět možné vidět velké odchylky naměřených hodnot. Toto může být opět zapříčiněno větším zesílením v dané délce vlákna, i když výkyvy nejsou tak velké jako v případě výkonu pumpy při 100 mW. Při pohledu na graf si je možné povšimnout, že hodnota zesílení prudce roste až do 4. metru a pak je přibližně stálá kolem hodnoty zesílení 17 dBm. Hodnota zesílení 17 dBm představuje 50 násobné zesílení signálu oproti jeho původní hodnotě. Celkový trend hodnoty zesílení je více patrný, když se graf naměřených hodnot proloží polynomicou funkcí 6. řádu kde rovnice této funkce je následující.

$$y = 7^{-6}x^6 - 0,0003x^5 + 0,0008x^4 + 0,1125x^3 - 1,9254x^2 + 11,627x - 6,42 \quad (5.9)$$

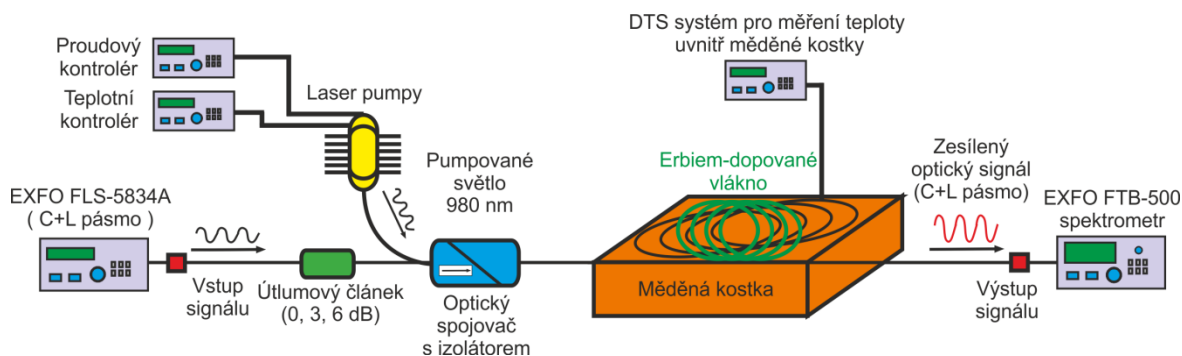
A kde hodnota spolehlivosti R je pro danou funkci R=0,6418.

Po proložení daných hodnot polynomicou funkcí 6. řádu je vidět, že k maximálnímu zesílení dochází při délce vlákna 14 metrů. Proto bylo vlákno zkráceno na 14. metru. Tato námi nalezená ideální délka se přibližně shoduje s ideální délkou udávanou výrobcem, který udává délku přibližně 15 metrů.

6. Testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě

6.1. Popis měřicího pracoviště a použitých komponent

Po sestavení měřicího pracoviště a nalezení optimální délky experimentálních Erbiem dopovaných vláken vzhledem k maximálnímu zesílení, bylo na řadě otestovat schopnost zesílení s použitím Erbiem dopovaných vláken za různých teplotních podmínek. Pro toto měření a testování jsme zvolili teploty v rozsahu 25°C až 90°C. Na obrázku 50 (Obr. 50) je vyobrazeno celkové zapojení měřicího pracoviště.



Obr. 50: Schéma zapojení při měření a testování schopnosti zesílení u experimentálních erbiem dopovaných vláken vzhledem k teplotě

Jako zdroj vstupního signálu pro C+L pásmo a výkonu 4 dBm byl použit laserový zdroj od firmy EXFO FLS-5834A. Jeho základní parametry jsou uvedeny v tabulce 13 (Tab. 13). Kompletní specifikace je uvedena v příloze A, kde jsou uloženy všechny manuály k použitým přístrojům a zařízením.

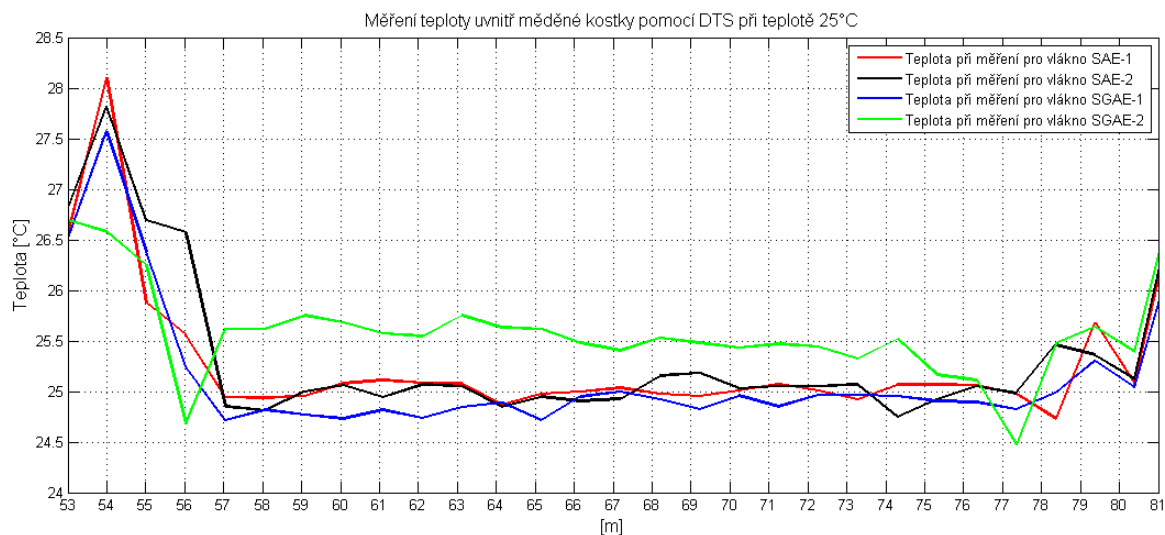
Výstupní výkon	Středová vlnová délka	Stabilita výkonu	Odstup signálu od SSE	Provozní teplota
4 dBm	1580 nm (± 10 nm)	< 0,075 dB	≥ 45	0°C - 40°C

Tab. 13: Laditelný zdroj EXFO FLS-5834A

Pro napájení pumpy byly opět použity stejné typy laserů, které byly popsány v kapitole 4.2.1. Do trasy byly vloženy útlumové články. Nejprve bylo měření provedeno bez útlumového článku. Poté byl do trasy vložen útlumový článek 3 dB a měření se opakovalo. Nakonec byl do trasy vložen útlumový článek 6 dB a měření bylo provedeno znovu. Útlumové články byly do trasy vloženy z důvodu otestování zesílení při různých útlumech. Poté byly experimentální Erbiem dopovaná vlákna umístěna dovnitř měděné kostky.

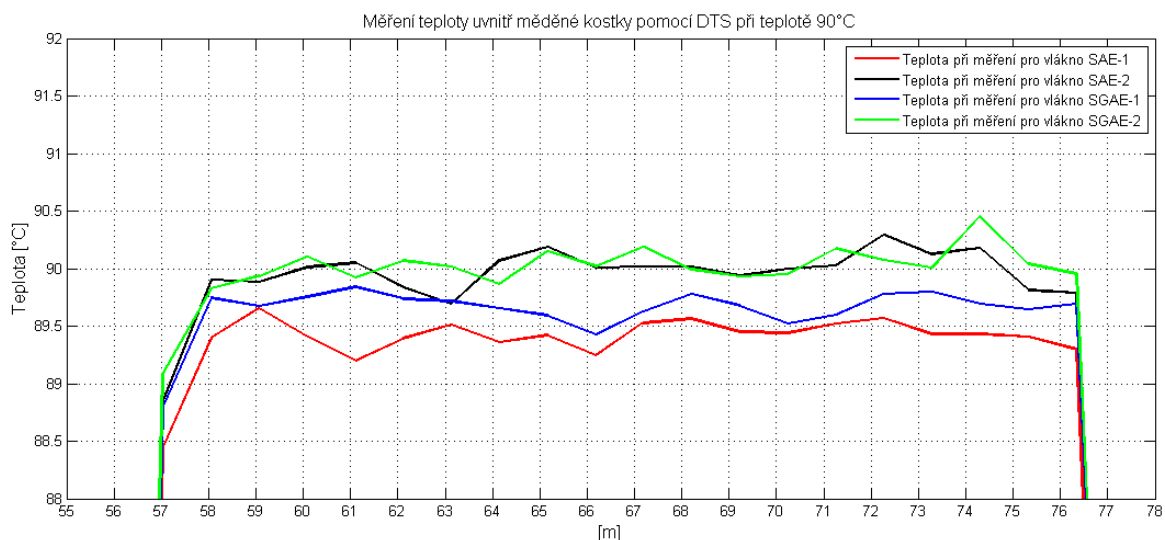
6.2. Měření teploty pomocí systému DTS

Pro přesné měření a sledování aktuální teploty uvnitř kostky byl použit systém DTS. Ten byl již detailně popsán v kapitole 4.1.1. Na obrázcích 51 a 52 (Obr. 51 a Obr. 52) níže, je možné vidět hodnoty teplot pro jednotlivá vlákna, která byla zaznamenána pomocí systému DTS a zpracována v programu Matlab.



Obr. 51: Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 25°C

Na obrázku 51 (Obr. 51) můžeme vidět, že při měření bylo dosaženo požadované teploty 25°C s odchylkou maximálně $\pm 1^\circ\text{C}$. Ve většině případů při měřeních se však hodnoty teploty pohybovaly v rozmezí $\pm 0,5^\circ\text{C}$ od požadované teploty, což lze považovat za velmi uspokojivý a dostatečný výsledek stabilizace teploty pro naše měření.



Obr. 52: Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 90°C

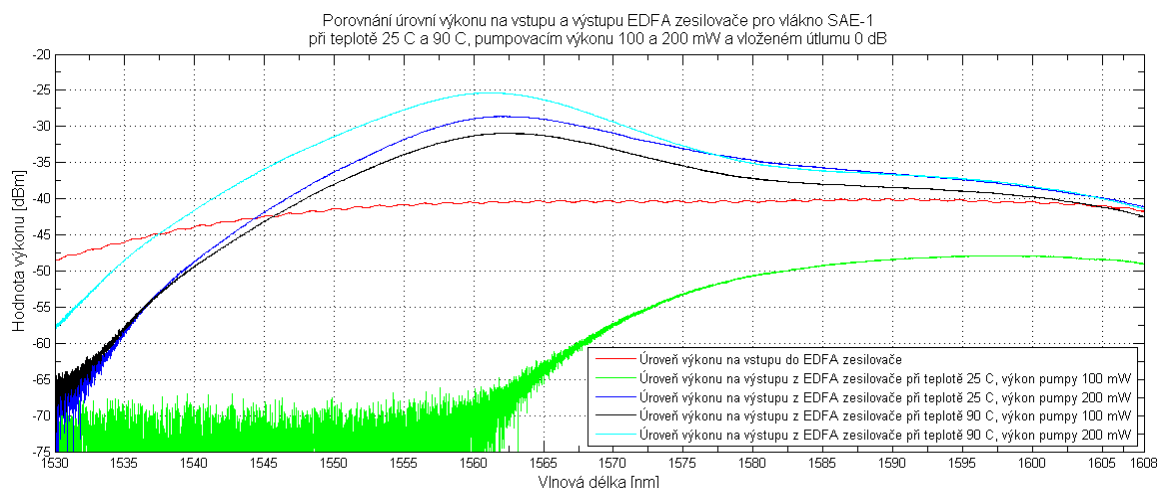
Na dalším obrázku 52 (Obr. 52) můžeme vidět hodnoty teploty v průběhu měření vláken, při požadované teplotě 90°C. Faktem opět zůstává, že teplota nepřekročila odchylku $\pm 1^\circ\text{C}$.

Ve většině případů se však opět teplota pohybovala v rozmezí $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Hodnoty teploty s odchylkou maximálně $\pm 1^\circ\text{C}$ se podařilo stabilizovat během všech měření pro všechna vlákna a to i při dosahování vyšších teplot, jako například při dosažení teploty 90°C. I na základě těchto měření lze konstatovat, že pro dosažení a následnou stabilizaci požadované teploty se Peltierovy články ukázaly jako velmi dobrá volba.

Pro měření výstupního signálu byl použit spektrometr značky EXFO, konkrétně model s označením FTB-500 s modulem 7200D. Specifikace parametrů tohoto měřicího přístroje lze nalézt v příloze A. Tento spektrometr byl schopen zaznamenat změny v C a L pásmu. Níže jsou uvedeny některé výstupy z tohoto měření. Na ukázkou schopnosti zesílení a vlivu teploty na Erbiem dopovaná vlákna, byly vybrány výsledky při pumpovacím (čerpacím) výkonu 100 mW a 200 mW, při teplotě 25 °C a 90°C a při vloženém útlumu 0, 3 a 6 dB. Kompletní výsledky z tohoto měření lze nalézt v příloze C.

6.3. Testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě

6.3.1. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-1



Obr. 53: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C a 90°C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

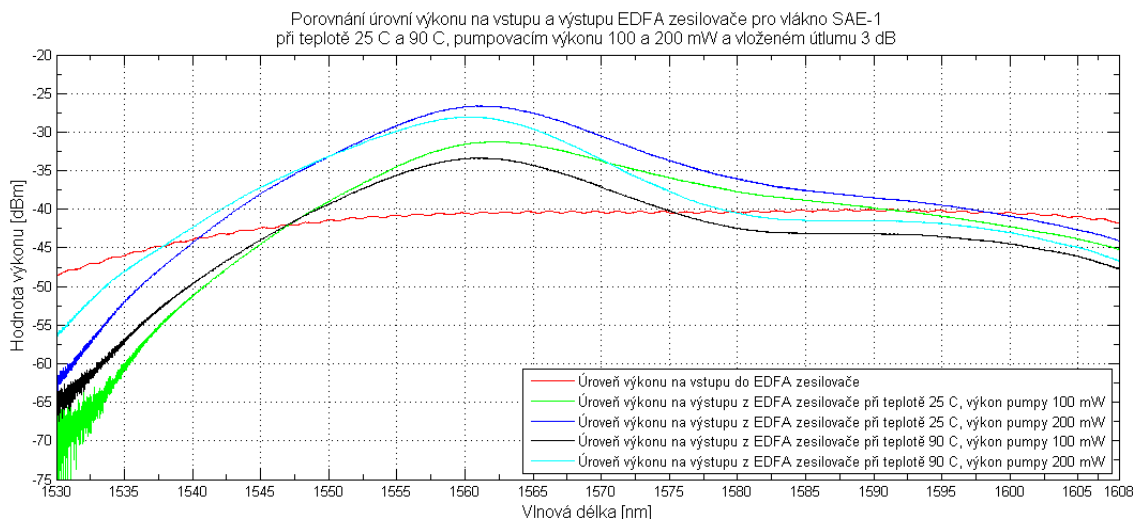
Jako první bylo na vliv teploty na zesílení testováno experimentální Erbiem dopované vlákno s označením SAE-1. Na obrázku 53 (Obr. 53) můžeme vidět výsledek z měření ze spektrometru FTB-500 s modulem 7200D. Do výsledného grafu byl přidán záznam úrovně výkonu na vstupu do experimentálního zesilovače EDFA. Tento záznam úrovně výkonu na vstupu je vykreslen červenou barvou. Vlákno SAE-1 bylo nejprve testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Na obrázku 53 (Obr. 53) je výsledný záznam znázorněn zelenou barvou a lze pozorovat, že signál v C pásmu je úplně utlumený a jeho hodnota se pohybuje kolem -70 dBm. Naopak signál v L pásmu není tak utlumený jako v případě C pásma a nejvyšší hodnoty výkonu se pohybují kolem -50 dBm. V tomto případě lze pozorovat jev, kdy Erbiem dopované vlákno není dostatečně vybuzeno a místo zesílení se projevuje opačná vlastnost a to utlumování především signálu v C pásmu.

Vlákno SAE-1 bylo následně testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB a záznam při těchto parametrech je na obrázku 53 (Obr. 53) znázorněn tmavě modrou barvou. Z obrázku 53 (Obr. 53) je patrné zesílení a to jak v C tak i v L pásmu v porovnání s předchozím náměrem. Vlákno je nyní více vybuzeno, aby tolik neutlumovalo C pásmo, ale naopak dopomáhalo k jeho zesílení. Je možné si všimnout, že v C pásmu je hodnota zesílení tlumena oproti vstupnímu signálu pro vlnové délky 1530 nm až 1545 nm. Nejvyšší hodnota zesílení se v C pásmu pohybuje lehce nad úrovní -30 dBm pro vlnovou délku 1562 nm.

Dále bylo toto vlákno SAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam při těchto parametrech je na obrázku 53 (Obr. 53) znázorněn černou barvou. Na obrázku 53 (Obr. 53) je možné pozorovat zlepšení výkonu především v C pásmu, oproti stejnému měření, avšak při teplotě 25°C. Maximální hodnota výkonu v C pásmu je lehce pod hranicí -30 dBm. Z obrázku 53 (Obr. 53) je vidět, že v C pásmu je hodnota výkonu utlumována mezi vlnovou délkou 1530 nm až 1545 nm. V L pásmu bylo také dosaženo mnohem lepších výsledků zesílení. Při teplotě 25°C se hodnota výkonu v L pásmu pohybovala kolem -35 až -45 dBm.

Následně bylo toto vlákno SAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam při těchto parametrech je na obrázku 53 (Obr. 53) znázorněn světle modrou barvou. Na obrázku 53 (Obr. 53) je možné pozorovat větší hodnotu maximálního výkonu zesílení a to -25 dBm, což představuje nárůst o více než 5 dBm, oproti předchozímu měření při výkonu pumpy 100 mW. Samozřejmě je pořád možné pozorovat jistý útlum v C pásmu. Při porovnání s předchozími měřeními je možné vidět, že křivka zesílení je stále stejná a jen narůstá celkové zesílení. Největší zesílení a to -25 dBm je dosaženo kolem vlnové délky 1562 nm.

Při celkovém porovnání naměřených hodnot je zřejmé, že v tomto případě, teplota kladně ovlivňovala výsledné hodnoty zesílení a to jak v C, tak i v L pásmu. U tohoto vlákna SAE-1 a při vloženém útlumu 0 dB bylo při teplotě 90°C bylo dosaženo lepších výsledků hodnoty zesílení než při 25°C.



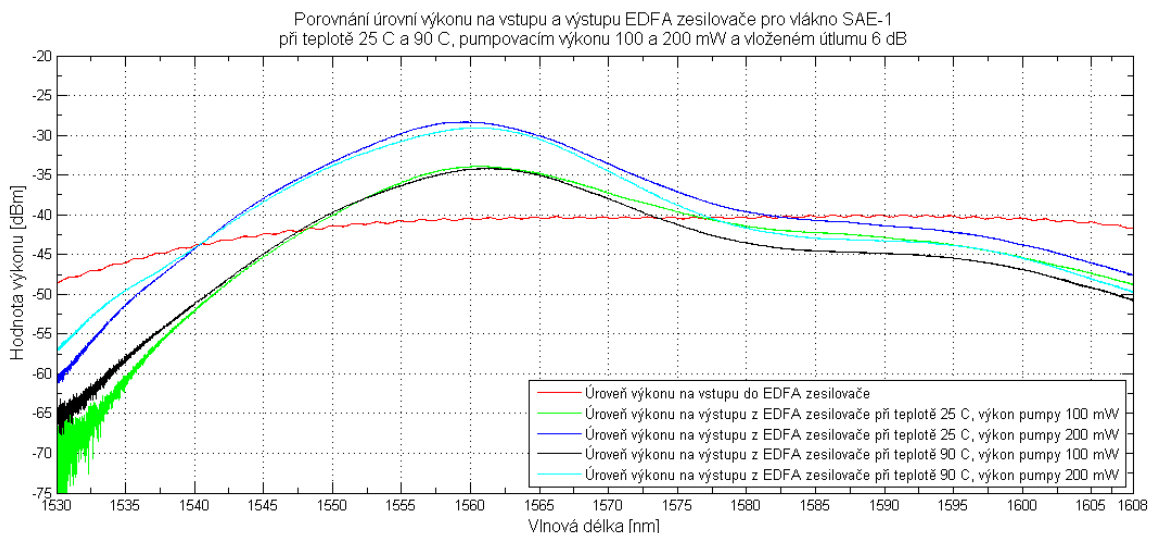
Obr. 54: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C a 90°C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB

SAE-1 vlákno bylo znovu testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a tentokrát byl do trasy vložen útlumový článek o hodnotě útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je znázorněn zelenou barvou. Na obrázku 54 (Obr. 54) je možné vidět stále stejnou křivku zesílení a to jak v C tak i v L pásmu, jako tomu bylo v předchozích případech. Rozdíl po přidání útlumového článku spočívá v celkovém snížení hodnoty výkonu pro C a L pásmo. Za povšimnutí stojí také fakt, že při výkonu pumpy 100 mW a při 25°C již vlákno SAE-1 dosahuje lepších výsledků než při 90°C, při stejném výkonu pumpy a C pásmo již není tolik utlumováno. Pořád je zde však patrný útlum mezi vlnovou délkou 1530 nm a 1545 nm. Toto může být způsobeno nedostatečným výkonem pumpy pro toto vlákno.

Následně bylo vlákno SAE-1 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a s přidáním vloženého útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 54 (Obr. 54) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 54 (Obr. 54) je možné pozorovat, že došlo ke zvýšení celkové hodnoty výkonu. V L pásmu došlo ke zvýšení hodnoty výkonu o 1-2 dBm. V C pásmu došlo k navýšení o 5-6 dBm. Toto bylo nejpravděpodobněji zapříčiněno redistribucí energie mezi pásmy. Nejvyšší hodnota výkonu v C pásmu se nachází kolem vlnové délky 1562 nm a je -27 dBm.

Dále bylo toto vlákno SAE-1 testováno opět při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a s přidáním vloženého útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 54 (Obr. 54) vykreslen černou barvou. Na obrázku 54 (Obr. 54) je možné pozorovat opět stejný vývoj křivky zesílení. Celkový zesilovací výkon poklesl o 2-3 dBm oproti měření se stejnými parametry, ale bez vloženého útlumu. Hodnota výkonu poklesla také vlivem teploty a tento pokles je výraznější v L pásmu.

Vlákno SAE-1 bylo testováno také při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 54 (Obr. 54) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 54 (Obr. 54) je možné pozorovat, že oproti měření při teplotě 25°C hodnota zesílení vlivem teploty 90°C mírně poklesla. Jedná se o pokles okolo 2-3 dBm. V L pásmu však byl tento pokles vyšší a hodnota výkonu se snížila působením teploty o přibližně 5 dBm. V L pásmu je vývoj křivky hodnoty zesílení obdobný jako tomu bylo v případě teploty 25°C. V C pásmu se opět nejvyšší hodnoty zesílení dosahuje okolo vlnové délky 1562 nm.



Obr. 55: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C a 90°C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB

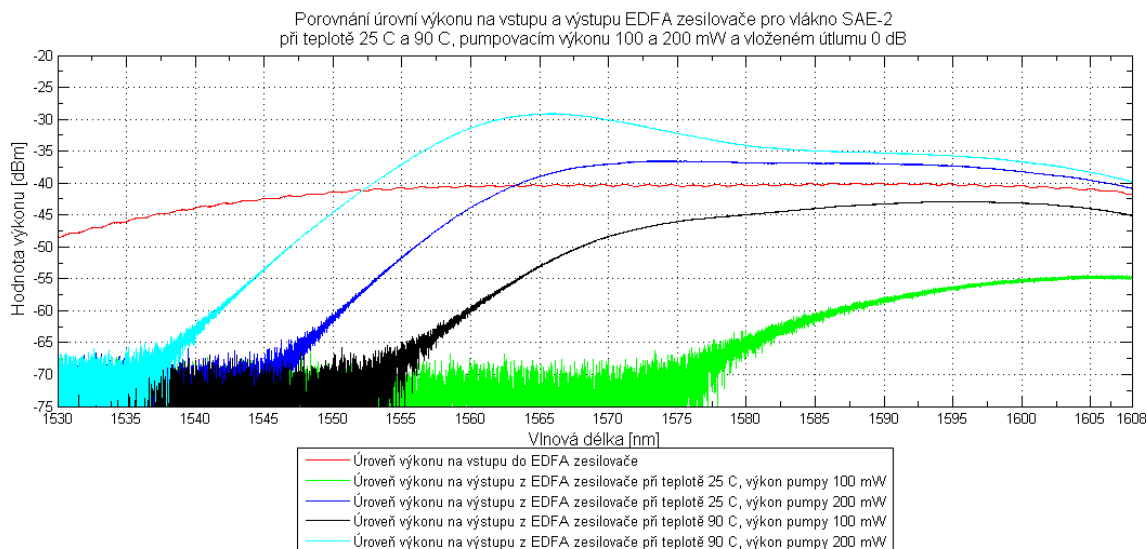
Vlákno SAE-1 bylo následně testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 55 (Obr. 55) a je vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 55 (Obr. 55) je možné vidět, že hodnota výkonu celkově poklesla. To je dáno hlavně větším vloženým útlumem a to o hodnotě 6 dB. Vývoj hodnoty křivky zesílení je v C i L pásmu podobný jako v minulých měřeních a k výraznějším změnám nedochází. Nejvyšší hodnota zesílení se nachází kolem vlnové délky 1562 nm a to -34 dBm.

Následně bylo vlákno SAE-1 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 55 (Obr. 55) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 55 (Obr. 55) je možné pozorovat, že v porovnání s předchozím měřením došlo k nárůstu zesílení vlivem většího pumpovacího výkonu. Avšak celkově při porovnání s měřením se stejnými parametry, ale s vloženým útlumem 3 dB, došlo jen k malým změnám v C pásmu (zeslabení 2 až 3 dBm). Nejvyšší hodnota zesílení v C pásmu je zde na vlnové délce 1560 nm a pohybuje se přibližně okolo hodnoty -28 dBm.

Dále bylo toto vlákno SAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 55 (Obr. 55) vykreslen černou barvou. Na obrázku 55 (Obr. 55) je možné vidět, že při porovnání tohoto obrázku a měření při teplotě 25°C, došlo jen k mírným změnám co se týče křivky zesílení a to především v L pásmu. Dokonce i při vzájemném porovnání maximálních hodnot zesílení na vlnové délce 1562 nm v C pásmu můžeme vidět jen nepatrné rozdíly v hodnotě zesílení. Hodnota zesílení se pohybuje kolem -34 dBm.

Poté bylo vlákno SAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 55 (Obr. 55) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 55 (Obr. 55) je možné pozorovat velice podobný vývoj křivky zesílení, jako tomu bylo v případě stejných parametrů, ale s teplotou 25°C. Naopak vlivem teploty došlo k posunu maximálního zesílení v C pásmu, které je posunuto z vlnové délky 1560 nm na vlnovou délku 1562 nm. Hodnota zesílení je naproti tomu skoro totožná a pohybuje se mezi -28 až -29 dBm.

6.3.2. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-2



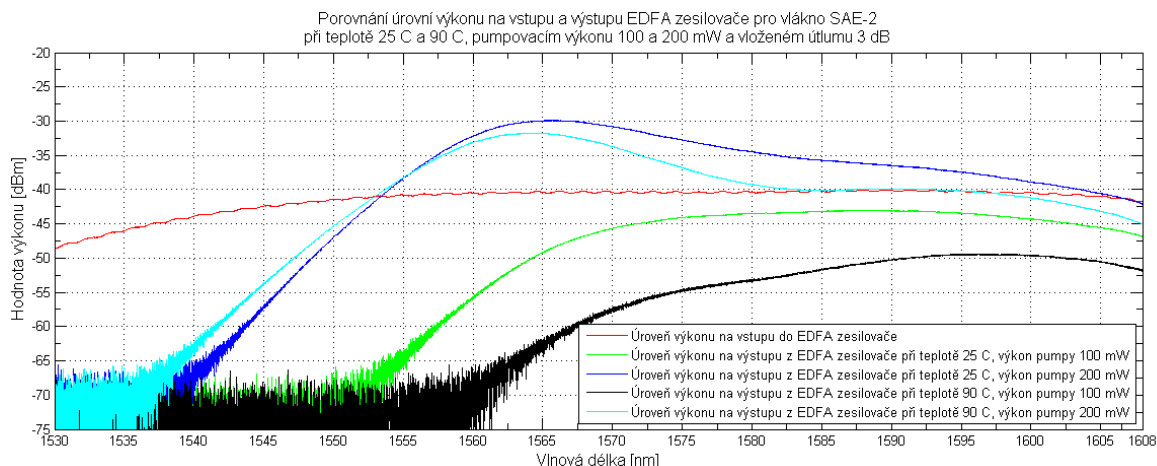
Obr. 56: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C a 90°C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Jako další bylo testováno vlákno SAE-2 a to nejprve při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 56 (Obr. 56) vykreslen zelenou barvou. Už při hledání ideální délky tohoto vlákna bylo zjištěno, že toto experimentální Erbiem dopované vlákno potřebuje pro vybuzení větší pumpovací výkon než 200 mW, který byl použit jako maximální pumpovací (čerpací) výkon pro toto měření. Potřeba většího výkonu pumpy je dána větším vlastním útlumem vlákna. Pro vlnovou délku 980 nm je hodnota útlumu 15 dB a pro vlnovou délku 1550 nm je to dokonce 30 dB. Na obrázku 56 (Obr. 56) je možné vidět, že při výkonu pumpy 100 mW je signál v celém C pásmu úplně utlumený. L pásmo je také utlumené a to především v rozsahu 1565 nm až 1580 nm. Nejvyšší hodnota výkonu v L pásmu se pohybuje okolo -55 dBm. V C pásmu je to jen -70 dBm a jedná se tedy spíše o šum než o plnohodnotný signál.

Toto vlákno SAE-2 bylo následně testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 56 (Obr. 56) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 56 (Obr. 56) je možné vidět, že celková hodnota zesílení vzrostla a to až k hodnotě výkonu -37 dBm. Nejvyšší hodnoty zesílení se v C a L pásmu pohybují shodně kolem této hodnoty výkonu -37 dBm. Přesto je stále možné pozorovat utlumení zesílení v C pásmu a to především na vlnových délkách 1530 nm až 1550 nm.

Dále bylo toto vlákno SAE-2 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 56 (Obr. 56) vykreslen černou barvou. Na obrázku 56 (Obr. 56) je možné vidět, že v porovnání se stejným měřením, ale při teplotě 25°C došlo k nárůstu zesílení v L pásmu a to o přibližně 10 dBm. Maximální hodnota zesílení se v L pásmu pohybuje kolem hodnoty -45 dBm. Co se týče C pásma je stále značně utlumené v porovnání s měřením při teplotě 25°C. Hodnoty zesílení se v C pásmu pohybují opět okolo -70 dBm, což je hodnota na úrovni šumu.

Vlákno SAE-2 bylo také testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 56 (Obr. 56) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 56 (Obr. 56) je možné pozorovat, že došlo opět k celkovému zesílení signálu vlivem většího výkonu pumpy a to především v L pásmu. C pásmo je stále utlumené a to hlavně jeho část na vlnové délce 1530 nm až 1540 nm. Maximální hodnota výkonu na pomezí C a L pásma kolem vlnové délky 1565 nm se blíží hodnotě -30 dBm. Co se týče působení teploty 90°C můžeme konstatovat, že v tomto případě jsou výsledky o něco málo příznivější než při teplotě 25 °C a teplota má na zesílení pozitivní vliv.



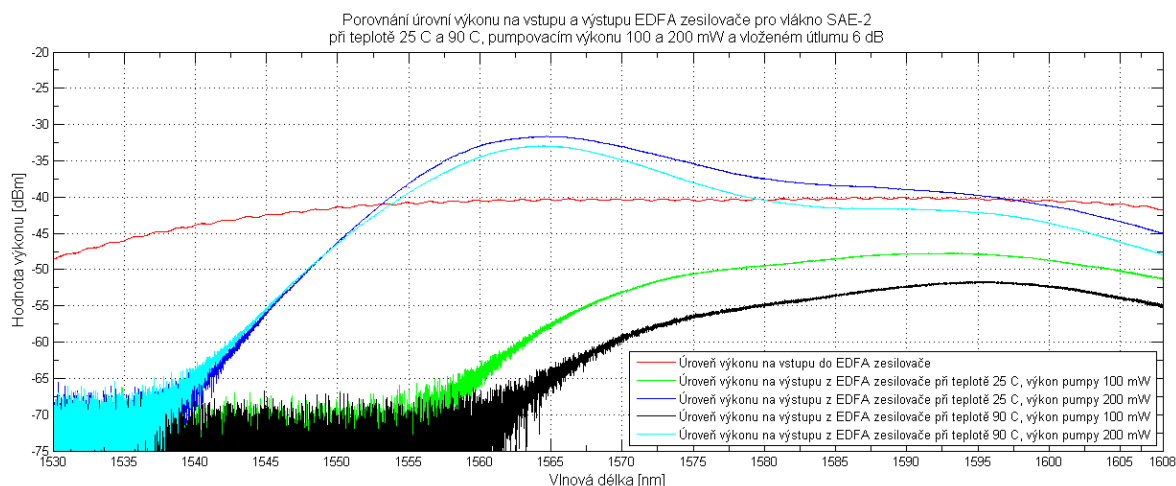
Obr. 57: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25 °C a 90 °C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB

V dalším bodě bylo toto vlákno SAE-2 testováno při teplotě 25 °C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 57 (Obr. 57) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 57 (Obr. 57) je možné vidět, že C pásmo je velmi utlumené a hodnota výkonu se pohybuje kolem -70 dBm a to především pro vlnové délky 1530 nm až 1550 nm. Pro L pásmo se hodnoty pohybují okolo hodnoty -43 dBm. Celkové utlumení je dáno malým výkonem pumpy a také přidáním vloženého útlumu o hodnotě 3 dB do trasy.

Dále bylo toto vlákno SAE-2 testováno při teplotě 25 °C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 57 (Obr. 57) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 57 (Obr. 57) je možné pozorovat, že při vyšším výkonu pumpy se zvedl i celkový výkon, který ve svém maximu dosahuje hodnoty zesílení -30 dBm a to na vlnové délce 1565 nm. Z obrázku je také vidět, že C pásmo je pořád značně utlumené a to především pro vlnové délky 1530 nm až 1545 nm. V porovnání stejného měření bez vloženého útlumu 3 dB došlo k poklesu energie v L pásmu a k navýšení energie zesílení kolem vlnové délky 1565 nm na pomezí konce C pásma a začátku L pásma.

Vlákno SAE-2 bylo následně testováno při teplotě 90 °C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 57 (Obr. 57) vykreslen černou barvou. Na obrázku 57 (Obr. 57) je možné vidět rapidní útlum zesílení a to v celém C pásmu. Hodnota výkonu se pohybuje kolem -70 dBm a jedná se spíše o šum než o plnohodnotný signál. Pokles úrovně výkonu je možné zaznamenat i v L pásmu, kde se jeho maximální hodnota pohybuje lehce nad -50 dBm. Zesílení signálu se tedy propadlo více než 7 dBm oproti stejnému měření, ale při teplotě 25 °C. Tento celkový pokles zesílení je způsoben právě působením teploty 90 °C.

Následně bylo toto vlákno SAE-2 testováno při teplotě 90 °C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 57 (Obr. 57) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 57 (Obr. 57) je možné vidět, že při výkonu pumpy 200 mW došlo opět k zesílení signálu a to jak v C tak i v L pásmu. Maximální hodnota zesílení je -32 dBm kolem vlnové délky 1565 nm. I přesto, že došlo ke zlepšení hodnoty zesílení signálu je stále patrné, že dochází k tlumení C pásma a to pro vlnové délky 1530 nm až 1545 nm. Při teplotě 90 °C došlo především k poklesu hodnoty výkonu v L pásmu a to i o 5 dBm. V C pásmu vlivem teploty došlo k poklesu o přibližně 2-3 dBm mezi vlnovou délkou 1560 nm až 1565 nm.



Obr. 58: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB

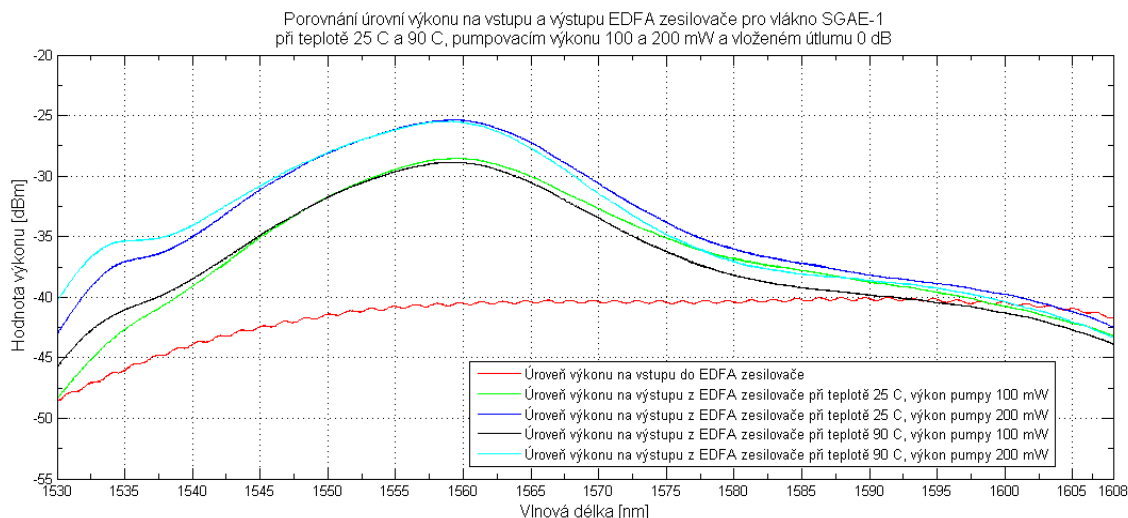
Dále bylo toto vlákno SAE-2 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 58 (Obr. 58) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 58 (Obr. 58) je možné pozorovat, že C pásmo je opět značně utlumené a hodnoty výkonu se pohybují okolo -70 dBm, což lze považovat za šum. Maximální hodnoty zesílení se pro L pásmo pohybují okolo -50 dBm. Celkové utlumení je způsobeno především nedostatečným výkonem pumpy (100 mW) a také vloženým útlumem 6 dB.

Vlákno SAE-2 bylo také testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 58 (Obr. 58) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 58 (Obr. 58) je možné pozorovat patrné zesílení, v porovnání s měřením při výkonu pumpy 100 mW. Maximální hodnota výkonu dosahuje hodnoty -32 dBm okolo vlnové délky 1565 nm. Z obrázku je také vidět útlum zesílení v C pásmu a to především pro vlnové délky 1530 nm až 1545 nm.

Vlákno SAE-2 bylo testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 58 (Obr. 58) vykreslen černou barvou. Na obrázku 58 (Obr. 58) je možné vidět, že C pásmo je opět zcela utlumené a hodnota zesílení se pohybuje okolo -70 dBm, což představuje hodnotu šumu. L pásmo je také značně utlumené a hodnota zesílení se pohybuje pod -52 dBm. Celkový pokles zesílení je způsoben jak nedostatečným výkonem pumpy, tak vloženým útlumem 6 dB, tak i působením teploty 90°C.

Dále bylo toto vlákno SAE-2 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 58 (Obr. 58) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 58 (Obr. 58) je možné vidět, že celkové zesílení se zlepšilo při porovnání s předchozím měřením. Nejvyšší hodnota zesílení je -32,5 dBm okolo vlnové délky 1565 nm. Z obrázku je také patrné, že C pásmo je pořád utlumené a to především pro vlnové délky 1530 až 1545 nm. Hodnota zesílení poklesla i v L pásmu a to kvůli většímu vloženému útlumu a také kvůli působení teploty 90°C.

6.3.3. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-1



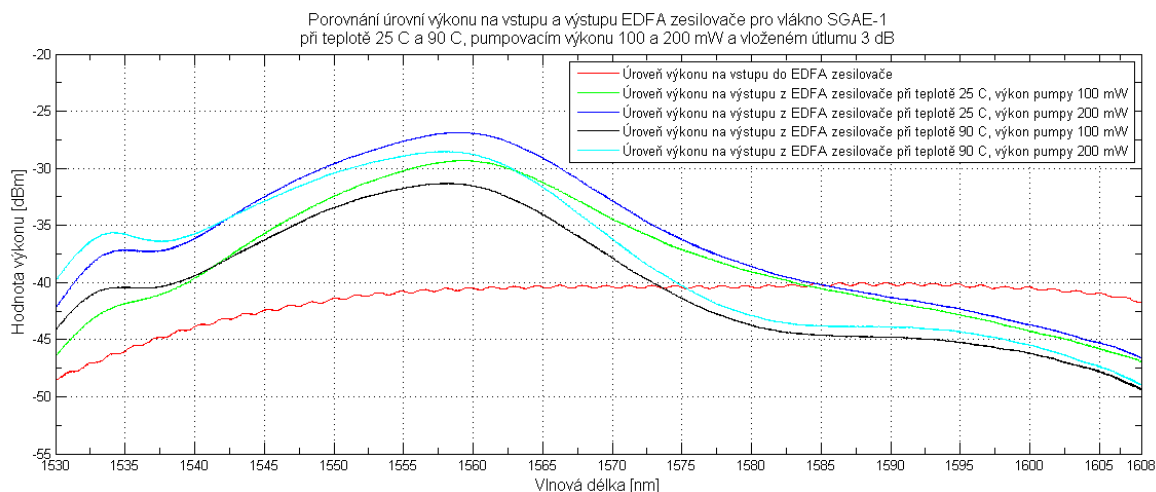
Obr. 59: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C a 90°C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Další vlákno, které bylo testováno, bylo vlákno SGAE-1. Nejprve bylo otestováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 59 (Obr. 59) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 59 (Obr. 59) je možné pozorovat, že již při výkonu pumpy 100 mW je C pásmo dostatečně zesilováno při porovnání například s vláknem SAE-2. Maximální hodnoty zesílení je dosaženo v C pásmu a to konkrétně -28 dBm. V C pásmu začíná hodnota úrovně výkonu na -48 dBm při vlnové délce 1530 nm a pak strmě stoupá, až k již zmíněné maximální hodnotě -28 dBm.

Vlákno SGAE-1 bylo následně testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 59 (Obr. 59) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 59 (Obr. 59) je možné pozorovat, že při zvýšení pumpovacího výkonu na 200 mW došlo k celkovému nárůstu hodnoty zesílení a to jak pro C tak i L pásmo. Charakteristika křivky zesílení je podobná jako v předchozím případě. Maximální hodnota zesílení je skoro -25 dBm při vlnové délce 1560 nm, což znamená nárůst o přibližně 3 dBm.

Následně bylo vlákno SGAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 59 (Obr. 59) vykreslen černou barvou. Na obrázku 59 (Obr. 59) je možné pozorovat, že teplota 90°C, hodnotu výkonu příliš neovlivňuje. Hodnota výkonu sice poklesla, ale jedná se o pokles v rámci 1-2 dBm. Jinak je charakteristika hodnoty zesílení totožná jako v předchozích případech.

Dále bylo toto vlákno SGAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 59 (Obr. 59) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 59 (Obr. 59) je možné pozorovat, že při porovnání s měřením při stejných parametrech, ale při teplotě 25°C, dochází vlivem teploty 90°C jen k malým odchylkám charakteristiky křivky zesílení oproti měření při teplotě 25°C. K těmto odchylkám dochází spíše v L pásmu. Maximální hodnota zesílení v C pásmu se nachází opět kolem vlnové délky 1560 nm a dosahuje hodnoty skoro -25 dBm.



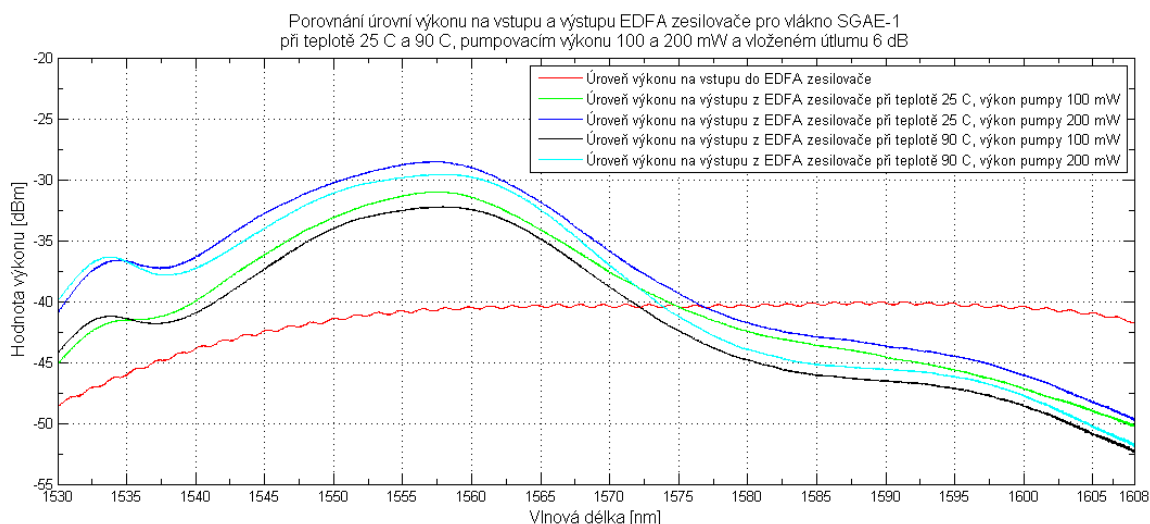
Obr. 60: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C a 90°C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB

Vlákno SGAE-1 bylo dále testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 60 (Obr. 60) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 60 (Obr. 60) je možné vidět, že po přidání vloženého útlumu 3 dB očekávaně poklesl výkon. V C pásmu poklesla hodnota zesílení v jednotkách kolem 1-2 dBm. Více se přidání 3 dB útlumového článku projevilo v L pásmu, kde kolem vlnové délky 1600 nm pokleslo zesílení o přibližně 5 dBm. Celková charakteristika zesílení pro C a L pásmo zůstává stejného charakteru.

Dále bylo toto vlákno SGAE-1 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 60 (Obr. 60) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 60 (Obr. 60) je možné pozorovat, že vlivem vloženého útlumu 3 dB do trasy, došlo celkově k zeslabení hodnoty zesílení o 2-3 dBm. Maximální hodnota zesílení dosahuje v tomto případě -28 dBm kolem vlnové délky 1558 nm. Charakteristika křivky zesílení zůstala téměř nezměněna oproti předchozím měřením.

Následně bylo vlákno SGAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 60 (Obr. 60) vykreslen černou barvou. Na obrázku 60 (Obr. 60) je možné pozorovat, že vlivem teploty 90°C, došlo ke snížení hodnoty zesílení o 3-4 dBm pro hodnotu maximálního zesílení kolem vlnové délky 1558 nm. Pro L pásmo se toto snížení hodnoty zesílení pohybuje kolem 5 dBm. Celková charakteristika zesílení zůstává téměř stejná jako v předchozích měřeních pro toto vlákno SGAE-1.

Toto vlákno SGAE-1 bylo také testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 60 (Obr. 60) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 60 (Obr. 60) je možné pozorovat, že vlivem teploty 90°C klesla maximální hodnota výkonu o 2-3 dBm oproti stejnému měření, ale při teplotě 25°C. V L pásmu je pak propad hodnoty zesílení více než 5 dBm. Za povšimnutí také stojí vznikající menší vrchol zesílení mezi vlnovou délkou 1530 nm a 1540 nm. Celková charakteristika křivky zesílení zůstala stejná vzhledem k předchozím měřením pro toto vlákno.



Obr. 61: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB

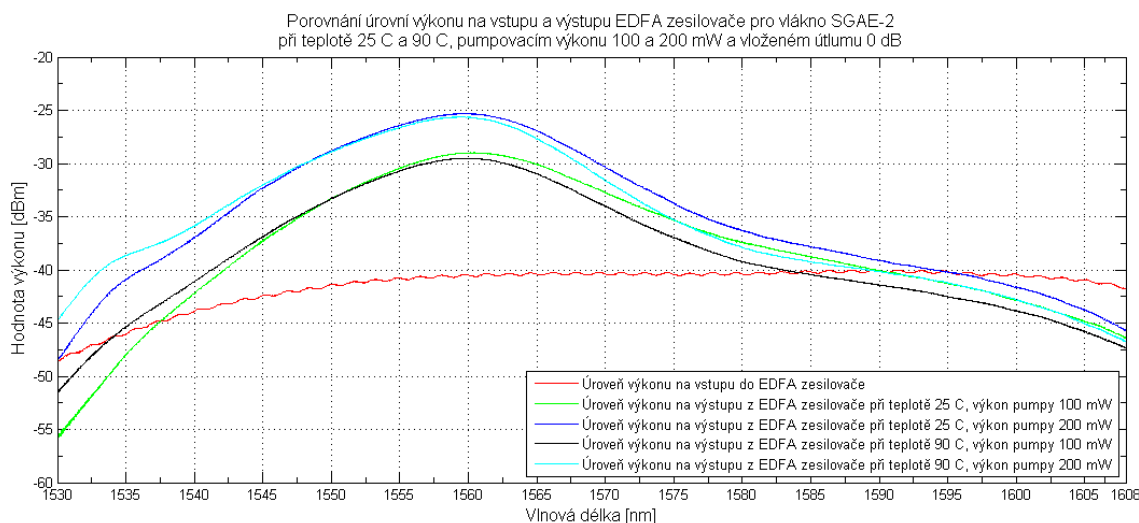
Vlákno SGAE-1 bylo poté testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 61 (Obr. 61) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 61 (Obr. 61) je možné pozorovat, že oproti předchozímu měření došlo k celkovému snížení hodnoty zesílení o 2-3 dBm. To je samozřejmě zapříčiněno větší hodnotou vloženého útlumového článku, která byla v tomto případě 6 dB. Maximální hodnota zesílení je -31 dBm a pohybuje se okolo vlnové délky 1558 nm. Celková charakteristika křivky zesílení zůstala opět zachována a nejsou patrné žádné výraznější odchylky od předchozích měření pro toto vlákno SGAE-1.

Poté bylo vlákno SGAE-1 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 61 (Obr. 61) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 61 (Obr. 61) je možné vidět, že došlo k celkovému snížení hodnoty výkonu o přibližně 2-3 dBm. K tomuto poklesu došlo jak v C tak i v L pásmu. To je zapříčiněno vloženým útlumem 6 dB. Za povšimnutí však stojí část mezi vlnovou délkou 1530 nm a 1540 nm. V této části naopak došlo k mírnému nárůstu hodnoty zesílení. Celková křivka zesílení zůstala opět zachována.

Dále bylo toto vlákno SGAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 61 (Obr. 61) vykreslen černou barvou. Na obrázku 61 (Obr. 61) je možné pozorovat, že vlivem působení teploty 90°C došlo k snížení hodnoty výkonu přibližně o 2 dBm. V L pásmu se snížení pohybuje kolem 3 až 4 dBm. Maximální hodnota zesílení je -32,5 dBm pro vlnovou délku přibližně 1558 nm. Působení teploty 90°C ještě více zvýraznilo malý nárůst hodnoty zesílení mezi vlnovou délkou 1530 nm a 1540 nm. Celková charakteristika křivky zesílení je opět bez větších změn.

Následně bylo vlákno SGAE-1 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 61 (Obr. 61) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 61 (Obr. 61) je možné vidět, že vlivem výkonu pumpy 200 mW vzrostl celkový výkon navzdory působení vysoké teploty 90°C. Nárůst výkonu se pohybuje kolem 2-3 dBm oproti měření, kde byl výkon pumpy 100 mW. Maximální hodnota výkonu je lehce nad -30 dBm a pohybuje se kolem vlnové délky 1558 nm. Působení teploty 90°C opět ještě více zvýraznilo malý nárůst hodnoty zesílení mezi vlnovou délkou 1530 nm a 1540 nm.

6.3.4. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-2



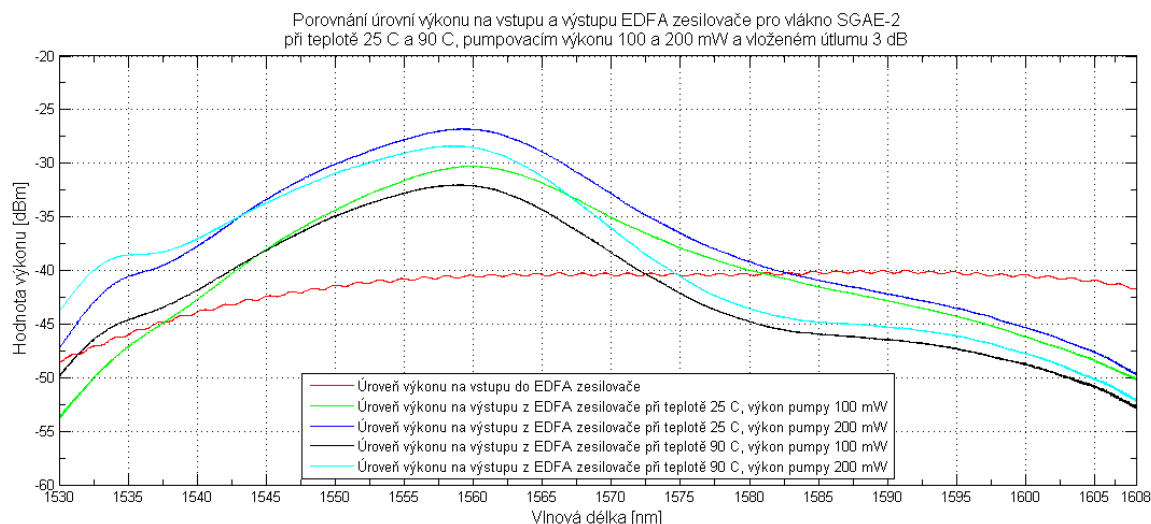
Obr. 62: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25 °C a 90 °C, pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Jako poslední bylo testováno vlákno SGAE-2 nejprve při teplotě 25 °C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 62 (Obr. 62) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 62 (Obr. 62) je možné pozorovat, že i při malém pumpovacím výkonu 100 mW došlo k zesílení signálu a to jak v C tak i v L pásmu. Maximální hodnota výkonu je -28 dBm a pohybuje se kolem vlnové délky 1560 nm. Lze také pozorovat, že zesílení je větší v C pásmu. Tyto hodnoty úrovně výkonu již při výkonu pumpy 100 mW, jsou dány parametry tohoto vlákna, kde vložný útlum je pro vlnovou délku 980 nm jen 6 dB a pro vlnovou délku 1550 nm 12 dB.

Vlákno SGAE-2 bylo následně testováno při teplotě 25 °C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 62 (Obr. 62) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 62 (Obr. 62) je možné pozorovat, že došlo k celkovému nárůstu hodnot zesílení a to přibližně o 4 dBm. Tento nárůst se týká především C pásma. Maximální hodnota zesílení je tedy skoro -25 dBm okolo vlnové délky 1560 nm. V L pásmu došlo také k zvýšení hodnoty zesílení přibližně o 2 dBm. Celková charakteristika křivky vývoje zesílení zůstala stejná.

Poté bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 90 °C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 62 (Obr. 62) vykreslen černou barvou. Na obrázku 62 (Obr. 62) je možné vidět, že i při zvýšení teploty na 90 °C, došlo jen k nepatrnému snížení hodnoty výkonu. Celkově se jedná o pokles 1-2 dBm. Celková charakteristika křivky zesílení zůstala až na malé odchylky stejná jako v případě teploty 25 °C. Maximální hodnota výkonu je -29 dBm okolo vlnové délky 1560 nm. Větší zesílení je patrné v C než v L pásmu.

Následně bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 90 °C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 0 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 62 (Obr. 62) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 62 (Obr. 62) je opět možné pozorovat, že výkon vlivem teploty 90 °C poklesl o 1-2 dBm. Maximální hodnota zesílení je -26 dBm a pohybuje se okolo vlnové délky 1559 nm. Vlivem teploty tedy došlo také k mírnému posunu, co se týče vlnové délky pro maximální hodnotu zesílení. Celková charakteristika křivky zesílení zůstala bez výraznějších změn oproti předchozím měřením pro toto vlákno. Větší pokles hodnoty výkonu nastal v L pásmu, kde nastal pokles přibližně o 2-3 dBm.



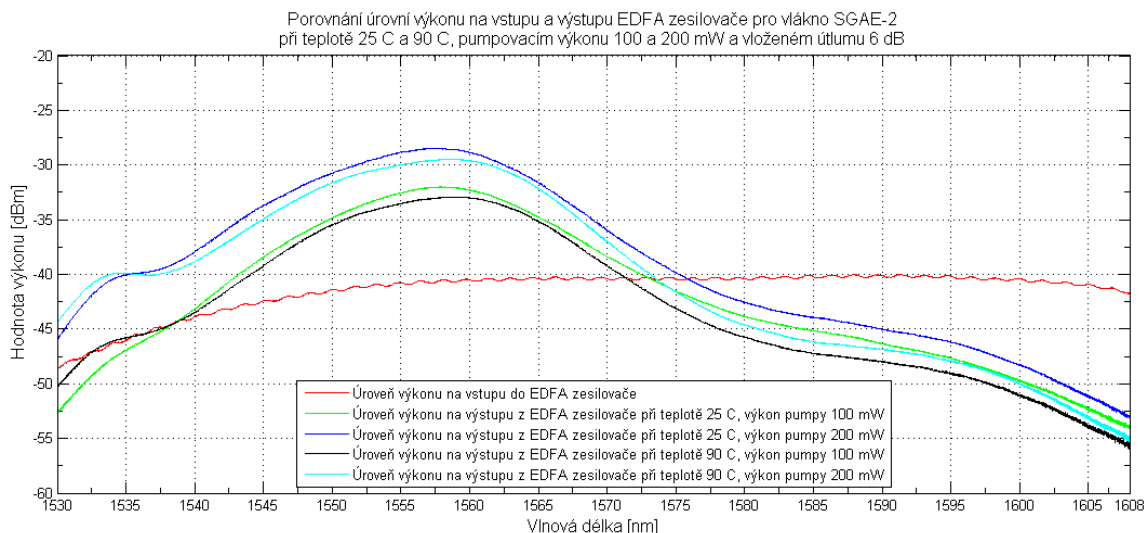
Obr. 63: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB

Vlákno SGAE-2 bylo testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 63 (Obr. 63) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 63 (Obr. 63) je možné pozorovat, že při přidání vloženého útlumu 3 dB do trasy celková hodnota zesílení poklesla o 1-2 dBm při porovnání s měřením se stejnými parametry, ale bez vloženého útlumu (Obr. 62). Maximální hodnota výkonu je lehce pod hodnotou -30 dBm okolo vlnové délky 1560 nm. Celková charakteristika křivky zesílení se opět nějak významně nezměnila.

Dále bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 63 (Obr. 63) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 63 (Obr. 63) je možné pozorovat, že s výkonem pumpy 200 mW, došlo i k celkovému nárůstu hodnoty zesílení. Maximální hodnota zesílení je -26 dBm okolo vlnové délky 1560 nm. Většího zesílení bylo dosaženo v C pásmu. V L pásmu se jedná jen o velice mírné zesílení okolo 1 dBm v porovnání s měřením, kde výkon pumpy byl 100 mW. Celková charakteristika křivky zesílení je opět velice totožná s předchozími měřeními pro toto vlákno.

Následně bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 63 (Obr. 63) vykreslen černou barvou. Na obrázku 63 (Obr. 63) je možné vidět, že působením teploty 90°C byla maximální hodnota zesílení okolo vlnové délky 1559 nm snížena o přibližně 3 dBm, při porovnání s měřením se stejnými parametry, ale s teplotou 25°C. Teplota 90°C také způsobila vychýlení maximální hodnoty zesílení z vlnové délky 1560 nm na vlnovou délku 1559 nm. V L pásmu vlivem teploty 90°C poklesla hodnota zesílení o přibližně 5 dBm. Celková charakteristika křivky zesílení zůstala zachována.

Poté bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 3 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 63 (Obr. 63) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 63 (Obr. 63) je možné pozorovat, že vlivem výkonu pumpy 200 mW došlo k nárůstu hodnoty zesílení. Maximální hodnota zesílení je -28 dBm okolo vlnové délky 1559 nm. Vlivem teploty došlo k jejímu posunutí z vlnové délky 1560 nm. Při porovnání s předchozím měřením se stejnými parametry při teplotě 25°C můžeme konstatovat, že vlivem teploty došlo ke snížení maximální hodnoty zesílení o 2 dBm. Dále je také možné povšimnout si mírného schodku, který se vytváří mezi vlnovými délkami 1530 nm a 1540 nm. Celková charakteristika se až na nepatrné odchylky nezměnila.



Obr. 64: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB

Při poslední části měření bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 64 (Obr. 64) vykreslen zelenou barvou. Na obrázku 64 (Obr. 64) je možné pozorovat, že celková hodnota výkonu vlivem vloženého útlumu 6 dB poklesla. Celkově o 2-3 dBm. Maximální hodnota výkonu přibližně -30 dBm se nachází okolo vlnové délky 1559 nm. Charakteristika křivky zesílení je totožná s předchozími měřeními pro vlákno SGAE-1. Toto je zapříčiněno podobností parametrů vláken SGAE-1 a SGAE-2.

Následně bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 25°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 64 (Obr. 64) vykreslen tmavě modrou barvou. Na obrázku 64 (Obr. 64) je možné vidět, že při výkonu pumpy 200 mW se hodnota zesílení zvýšila o 3 až 4 dBm v porovnání s předchozím měřením při výkonu pumpy 100 mW. Maximální hodnota zesílení je -28 dBm. Mezi vlnovou délkou 1530 nm a 1540 nm je možné pozorovat nepatrný schodek nárůstu hodnoty zesílení. Samozřejmě došlo k nárůstu hodnoty zesílení i v L pásmu a to průměrně o 1-2 dBm.

Dále bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 100 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 64 (Obr. 64) vykreslen černou barvou. Na obrázku 64 (Obr. 64) je možné pozorovat, že vlivem působení teploty 90°C, došlo ke snížení hodnoty zesílení o 2-3 dBm. Maximální hodnota zesílení je -33 dBm okolo vlnové délky 1559 nm. Z obrázku 64 (Obr. 64) si také můžeme povšimnout strmějšího propadu hodnoty zesílení v L pásmu. Celková charakteristika křivky zesílení zůstala opět výrazně nezměněna.

Jako poslední bylo vlákno SGAE-2 testováno při teplotě 90°C, při výkonu pumpy 200 mW a vloženém útlumu 6 dB. Záznam z tohoto měření je na obrázku 64 (Obr. 64) vykreslen světle modrou barvou. Na obrázku 64 (Obr. 64) je možné vidět, že při výkonu pumpy 200 mW nejsou tak patrné negativní jevy teploty 90°C na snížení hodnoty zesílení a to především v C pásmu. Naproti tomu v L pásmu můžeme sledovat strmější propad hodnoty zesílení. Útlum vlivem teploty není v C pásmu skoro znatelný na rozdíl od L pásma při porovnání s předchozím měřením při stejných parametrech, ale při teplotě 25°C. Maximální hodnota zesílení je lehce přes -30 dBm okolo vlnové délky 1559 nm. Za povšimnutí stojí také schodek nárůstu energie mezi vlnovou délkou 1530 nm a 1540 nm. Celková charakteristika zůstala podobná jako v předchozích měřeních pro toto vlákno.

7. Testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě při zapojení do WDM-PON sítě

Dalším bodem při realizaci této diplomové práce bylo testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě při zapojení do WDM-PON sítě, která byla umístěna v laboratoři přístupových sítí v místnosti EB316.

7.1. Popis použitých komponent v testovací síti WDM-PON

Jak již bylo řečeno testovací WDM-PON síť byla sestavena v laboratoři EB316. Pro vytvoření WDM-PON sítě byla použita OLT jednotka s označením EAST 1100 od firmy LG Nortel. Dále bylo nutné použít atermální směrovou odbočnici AWG s označením WPF 1132c od firmy LG Nortel. Jako ONU jednotky bylo použito 6 koncových jednotek s označením EARU 1112 opět od stejného výrobce a to firmy LG Nortel. Dále budou všechny tyto komponenty detailněji popsány, včetně popisu parametrů a zvolených komponent, co se týče přenosové trasy. Kompletní parametry a manuály pro uvedené komponenty jsou umístěny v příloze A.

7.1.1. OLT jednotka EAST 1100

Hlavní komponentou WDM-PON sítě je bezpochyby tato OLT jednotka s označením EAST 1100 od firmy Nortel. OLT jednotka EAST 1100 pracuje na principu DWDM-PON sítě a nabízí podporu pro přenos dat a to až pro 32 vlnových délek o přenosové rychlosti 100 Mbit/s pro jedno optické vlákno. Výrobce udává překlenutelný dosah až 20 km. Samotné provedení OLT jednotky EAST 1100 je uzpůsobeno umístění do rozvaděčů a velikost této OLT jednotky je 10 U. OLT jednotka obsahuje dvě karty L2/L3, tedy přepínač a síťové rozhraní. Dále také řídící kartu MC (Management Card) a možnost použití až osmi karet SI (Service Interface), které slouží pro vytvoření rozhraní mezi koncovými jednotkami EARU 1112. Pokud jednotka EAST 1100 obsahuje všech osm SI karet je schopna vysílat 256 kanálů při stejné přenosové rychlosti 100 Mbit/s pro každý jednotlivý kanál. OLT jednotka EAST 1100 vysílá datový přenos v sestupném směru v L pásmu a ve vzestupném směru vysílá datový přenos v C pásmu. V C pásmu vysílá jednotka OLT také širokospektrální zdroj záření BLS, který umožňuje naladění bezbarvých koncových jednotek EARU 1112 na požadované vlnové délky. Konfigurace jednotky OLT EAST 1100 probíhá buď přes grafické prostředí EMS (Elements Management System) nebo je možné využít konfigurace přes příkazový řádek.

Při nastavování jednotky OLT EAST 1100 pro potřeby tohoto měření byly zvoleny a aktivovány kanály koncových jednotek s číslem 1,2,10,20,31,32. Tyto konkrétní kanály byly vybrány z důvodu dostupnosti pouze šesti koncových jednotek EARU 1112 v laboratoři EB316. Konkrétní rozmezí kanálů bylo vybráno tímto způsobem také proto, abychom při měření mohli vidět zesílení nejen na začátku C pásma, ale také uprostřed a na jeho konci. Níže je umístěna tabulka 14 (Tab. 14) s těmito kanály i s uvedenou vlnovou délkou. Tabulka s dokumentací a kompletním přehledem kanálů a jejich vlnových délek pro C a L pásmo je uvedena v příloze A v manuálu k jednotce OLT EAST 1100.

Číslo kanálu	1	2	10	20	31	32
Frekvence (THz)	195,50	195,40	194,60	193,60	192,50	192,40
Vlnová délka (nm)	1533,465	1534,250	1540,557	1548,515	1557,363	1558,173

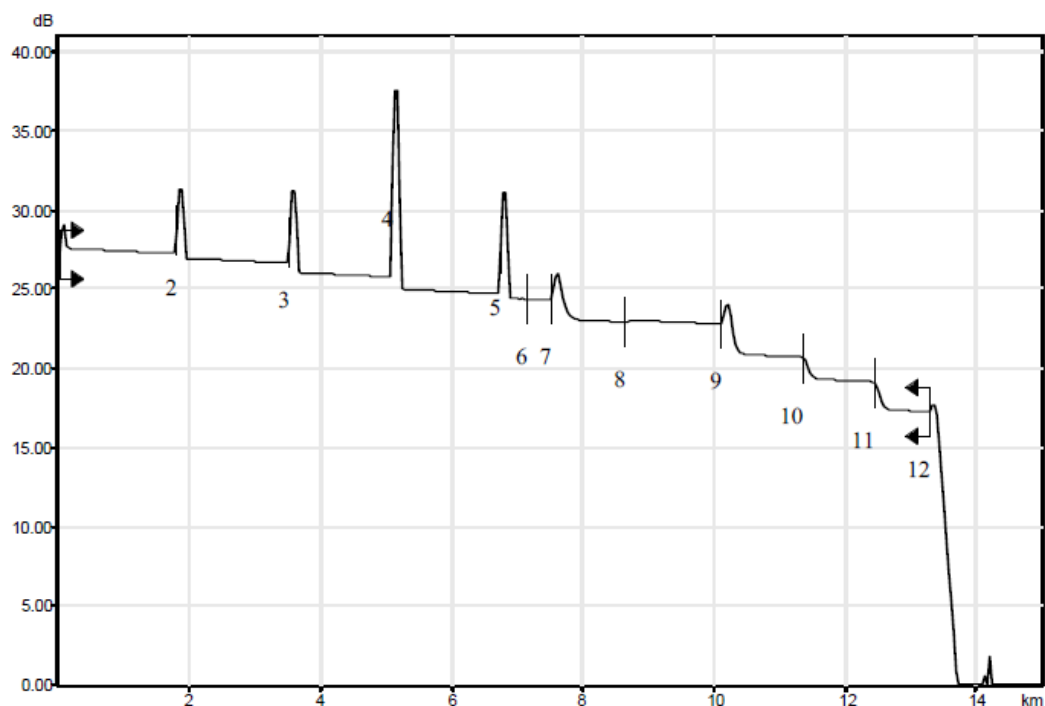
Tab. 14: Zvolené kanály koncových jednotek a jejich vlnových délek

7.1.2. AWG směrová odbočnice

V naší testovací WDM-PON síti byl použit vlnově délkový pasivní filtr s označením WPF 1132c, který umožňuje multiplexování a demultiplexování vlnových délek na trase mezi OLT jednotkou EAST 1100 a koncovými jednotkami EARU 1112. Funkce pasivního filtru WPF spočívá v to, že přijímá jednotlivé kanály na různých vlnových délkách vysílané jednotkou OLT a následně je dělí podle vlnové délky pro koncové jednotky EARU 1112. V opačném směru provádí agregaci vysílaných kanálů a jejich následné přivedení zpět do jednotky OLT. WPF filtr 1132c obsahuje atermální směrovou odbočnici. Tato odbočnice je pasivní a nepotřebuje tedy externí napájení a je provedena ve verzi Cabinet.

7.1.3. Přenosová trasa

Pro přiblížení se co nejreálnější topologii byla vytvořena přenosová trasa, která měřila 13,292 km. Tato trasa byla vytvořena pomocí svaření více cívek s optickým vláknem SM G.652D s různou délkou k sobě. V jednom případě byly k sobě cívky spojeny konektory. Po propojení cívek byla tato trasa proměřena pomocí reflektometru OTDR s označením FTB 7200D od firmy EXFO a tento modul byl umístěn v univerzální platformě FTB 500. Měřicí přístroj OTDR byl připojen k přenosové trase a trasa byla následně proměřena. Na následujícím obrázku 65 (Obr. 65) je vyobrazen grafický výstup z měření přenosové trasy pro vlnovou délku 1550 nm. Z obrázku 65 (Obr. 65) je patrný vyšší útlum v některých bodech. Tyto body představují sváry optických vláken. Bod 4 s nejvyšším útlumem představuje spojení pomocí konektorů a spojky. Celková ztráta trasy je 10,37 dB.



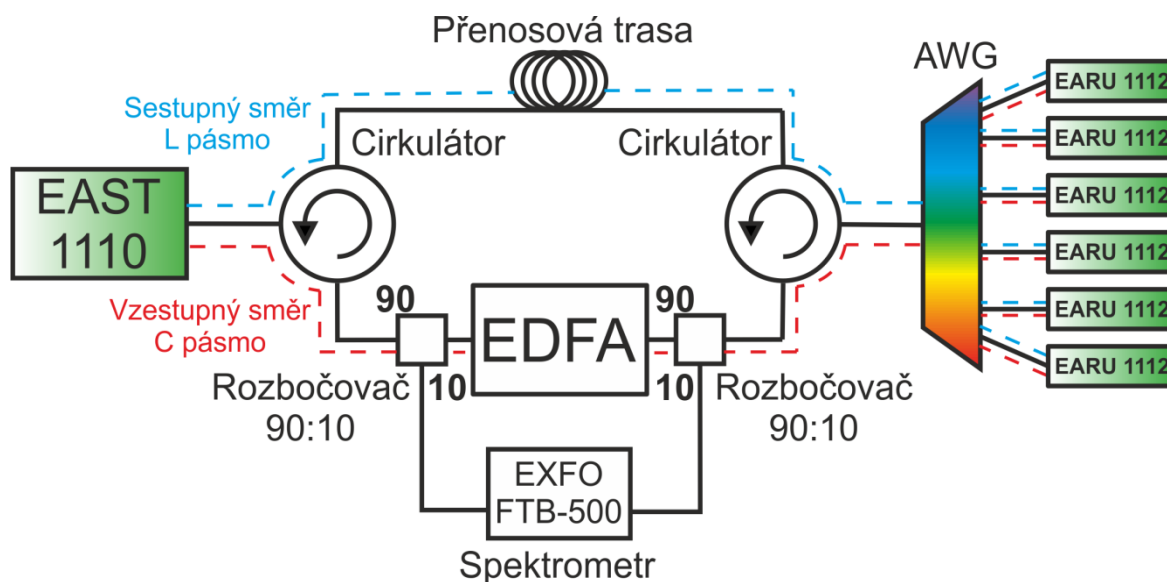
Obr. 65: Křivka zpětného rozptylu přenosové trasy pro vlnovou délku 1550 nm

7.1.4. Koncové jednotky EARU 1112

Koncová jednotka ONU, v našem případě model EARU 1112, plní funkci optického zakončení sítě u koncových uživatelů. Tato jednotka je takzvaně bezbarvá a to díky schopnosti ladění se na požadované kanály a tedy možnost poskytovat jednoduché nasazení u koncových uživatelů bez nutnosti dalších technických zásahů a nastavování. Tato koncová jednotka EARU 1112 je schopna podporovat velké množství různých služeb prostřednictvím Ethernet portu 100Base-TX. Detailní parametry této koncové jednotky jsou uvedeny v příloze A.

7.2. Experimentální zapojení sítě WDM-PON

Po nastavení OLT jednotky EAST 1110 a také šesti koncových jednotek EARU 1112 bylo nutné propojit a zprovoznit celou experimentální WDM-PON síť. Při propojení byly použity, jak již dříve zmíněné komponenty, tak samozřejmě další rozbočovače a cirkulátory, které se nacházely v laboratoři EB316. Také bylo nutné použít další optickou kabeláž na propojení jednotlivých komponent. Po zkompletování a otestování funkčnosti experimentální WDM-PON sítě bylo nutné zapojit ještě námi navržený EDFA zesilovač. Ten byl připojen do trasy ve vzestupném směru v C pásmu. Následně byl spektrometr EXFO FTB-500 s modulem 7200D připojen na výstup rozbočovače, kterým prochází 10% vstupního signálu a byl změřen výkon jednotlivých kanálů před EDFA zesilovačem tak, aby bylo možné porovnat úroveň výkonu signálu před zesílením. Při samotném měření byl spektrometr EXFO FTB-500 s modulem 7200D zapojen za zesilovačem a byl opět připojen na výstup rozbočovače, kterým prochází 10% vstupního signálu. Na následujícím obrázku 66 (Obr. 66) níže je uvedeno schéma experimentální WDM-PON sítě.



Obr. 66: Experimentální zapojení testovací WDM-PON sítě se zapojeným EDFA zesilovačem

Na následujících obrázcích 67 a 68 (Obr. 67 a Obr. 68) je zobrazeno kompletní zapojení experimentální WDM-PON sítě v laboratoři EB316.



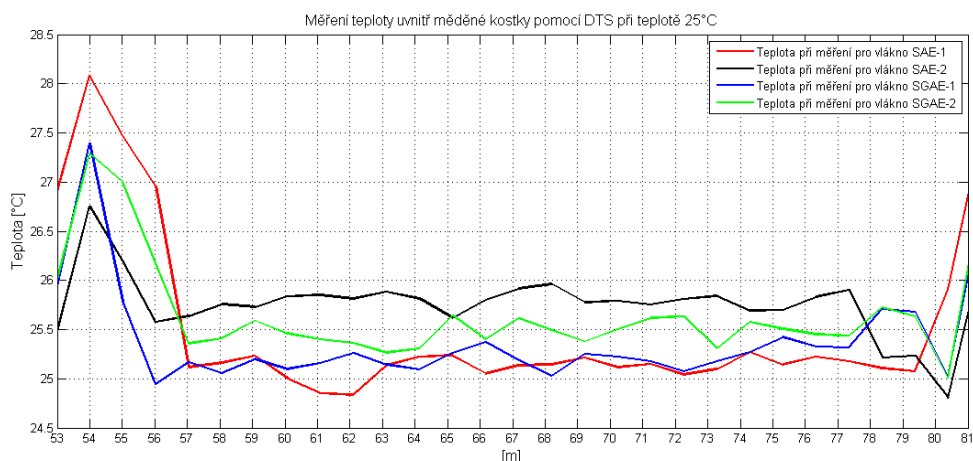
Obr. 67: Experimentální zapojení testovací WDM-PON sítě se zapojeným EDFA zesilovačem v laboratoři EB316 (Kompletní zapojení celé sítě)



Obr. 68: Experimentální zapojení testovací WDM-PON sítě se zapojeným EDFA zesilovačem v laboratoři EB316 (Pohled na navržený experimentální zesilovač EDFA)

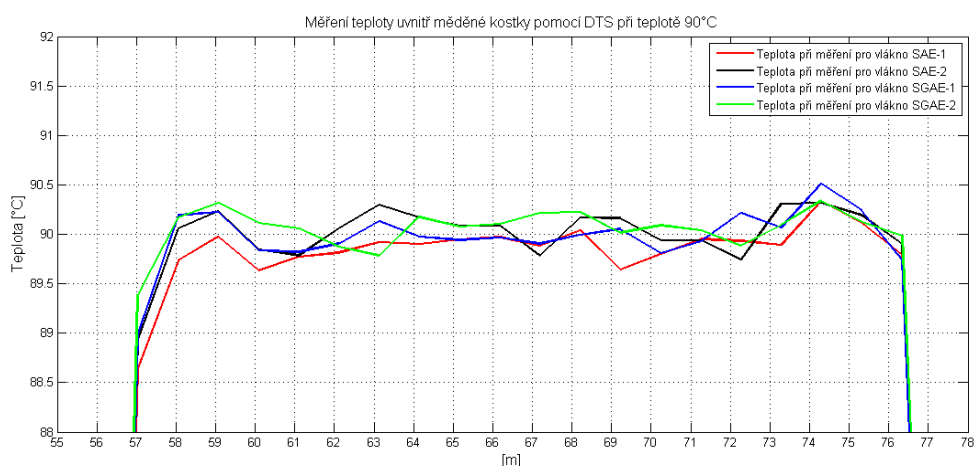
7.3. Měření teploty pomocí systému DTS

Pro přesné měření a sledování aktuální teploty uvnitř měděné kostky v průběhu měření byl opět použit systém DTS. Ten byl již detailně popsán v kapitole 4.1.1. Na obrázcích 69 a 70 (Obr. 69 a Obr. 70) níže je možné vidět hodnoty teplot pro jednotlivá vlákna, která byla zaznamenána pomocí systému DTS při měření v experimentální síti WDM-PON.



Obr. 69: Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 25°C při zapojení v experimentální síti WDM-PON

Na obrázku 69 (Obr. 69) můžeme vidět, že při měření bylo opět dosaženo požadované teploty 25°C s odchylkou maximálně $\pm 1^\circ\text{C}$. Ve většině případů při měřeních se však hodnoty teploty pohybovaly v rozmezí $\pm 0,5^\circ\text{C}$ od požadované teploty, což lze považovat za velmi uspokojivý a dostatečný výsledek stabilizace teploty pro naše měření a testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken v síti WDM-PON.

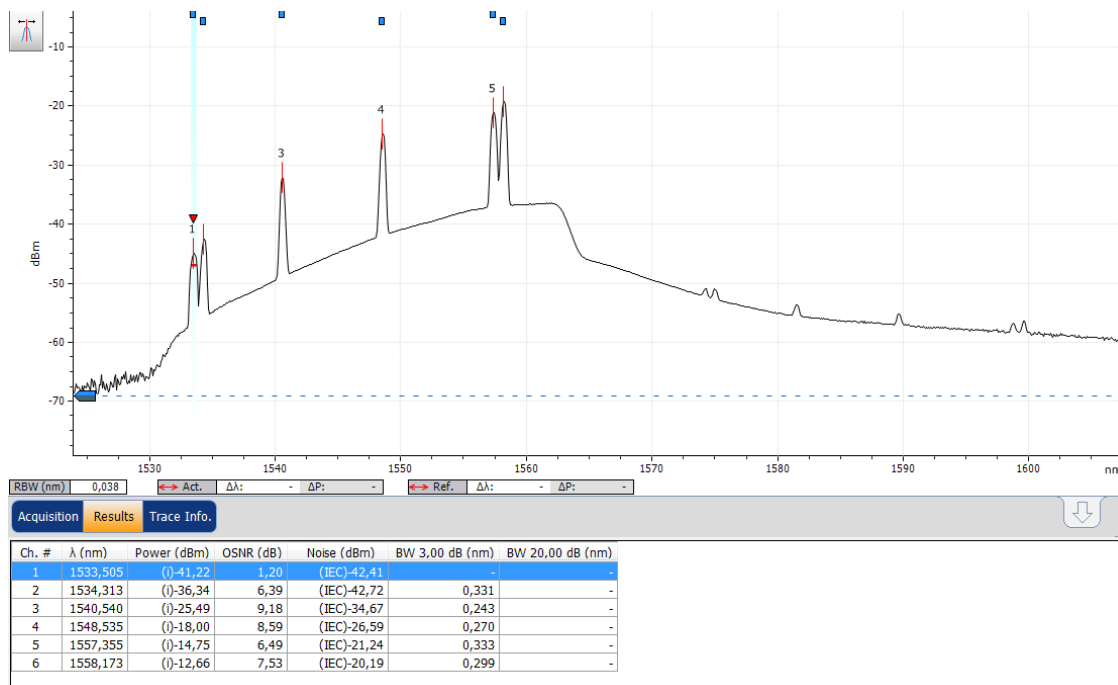


Obr. 70: Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 90°C při zapojení v experimentální síti WDM-PON

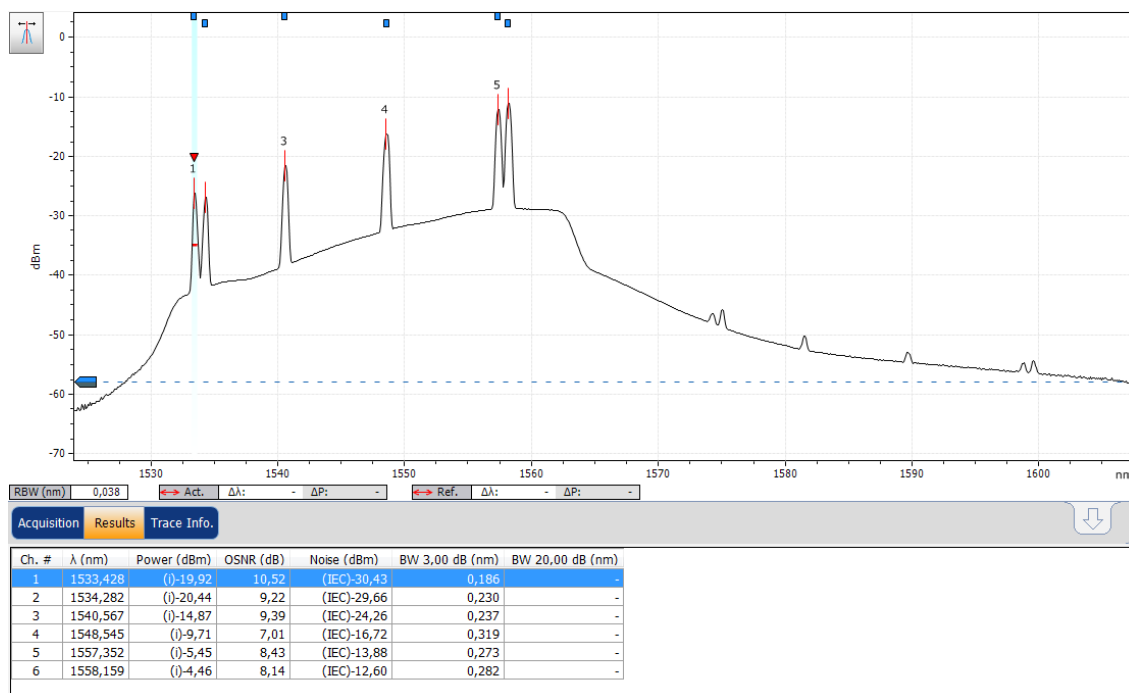
Na dalším obrázku 70 (Obr. 70) můžeme vidět hodnoty teploty při měření vláken při požadované teplotě 90°C. Faktem opět zůstává, že teplota opět nepřekročila odchylku $\pm 1^\circ\text{C}$. Ve většině případů se však pohybovala v rozmezí $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Hodnoty teploty s odchylkou maximálně $\pm 1^\circ\text{C}$ se podařilo stabilizovat během všech měření pro všechna vlákna a to i při dosahování vyšších teplot. Lze tedy konstatovat, že z hlediska stabilizace teploty, bylo dosaženo ideálních podmínek pro měření a testování experimentálních Erbiem dopovaných neboli námi navrženého EDFA zesilovače při zapojení do testovací sítě WDM-PON.

7.4. Testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě při zapojení do WDM-PON sítě

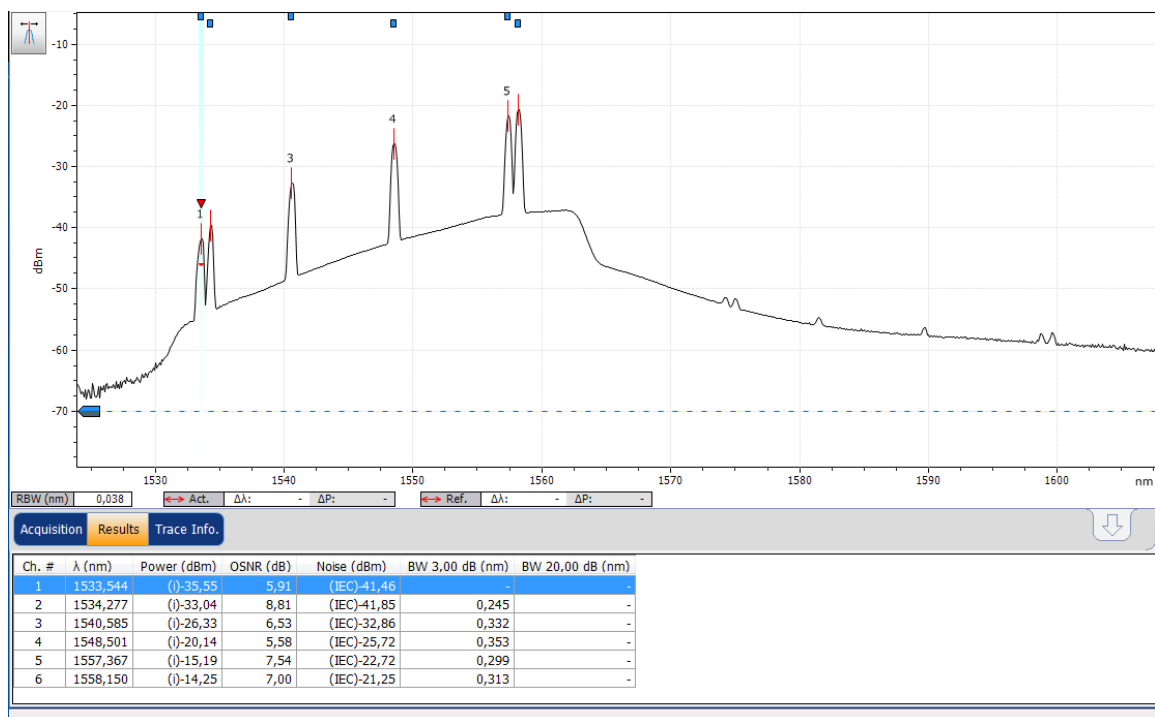
7.4.1. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-1



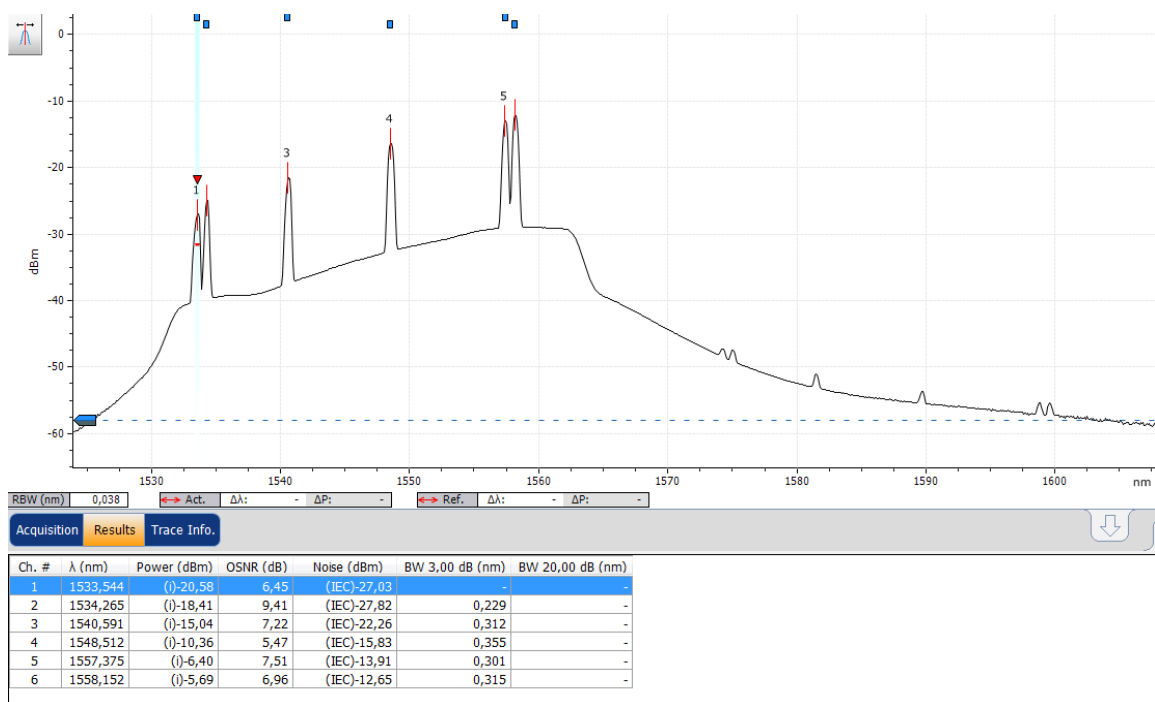
Obr. 71: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



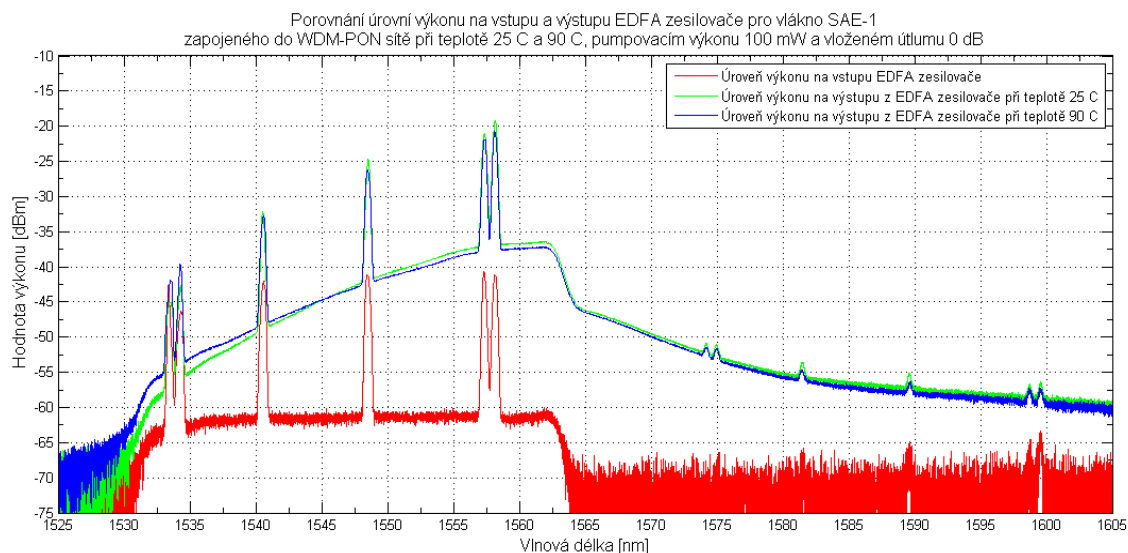
Obr. 72: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



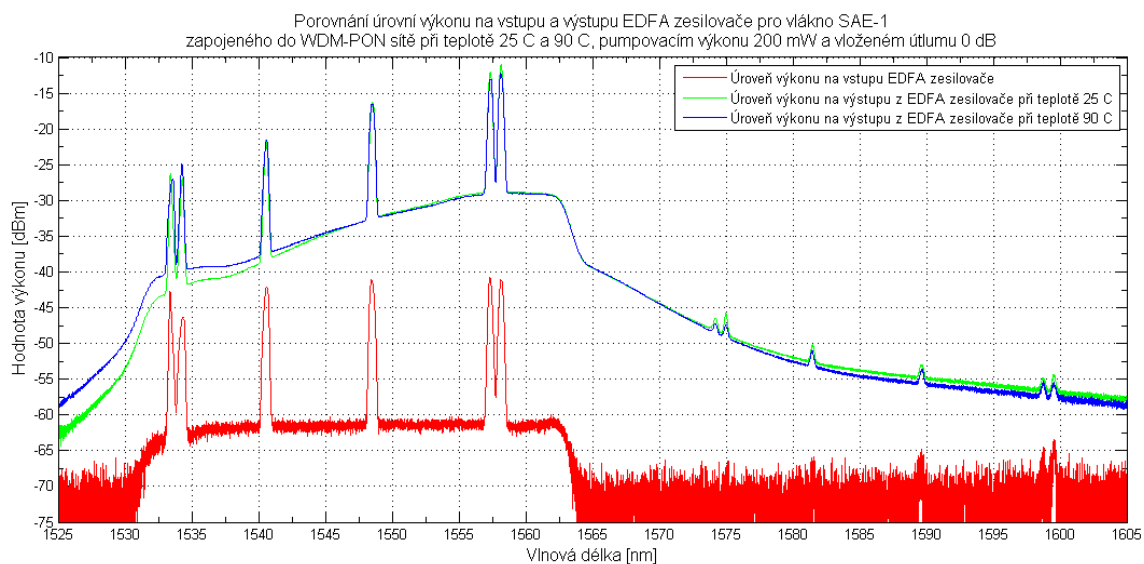
Obr. 73: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 74: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 75: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB



Obr. 76: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Na obrázcích (Obr. 71-74) jsou zobrazeny náměry z měření v experimentální síti WDM-PON s použitím Erbiem dopovaného vlákna SAE-1 při výkonech pumpy 100 mW a 200mW a při vystavení teplotám 25°C a 90°C. Tyto obrázky (Obr. 71-74) byly zhotoveny spektrometrem EXFO FTB-500 s modulem 7200D. Na obrázku 71 (Obr. 71) můžeme pozorovat, že při pumpovacím výkonu 100 mW experimentální EDFA zesilovač nedosahuje požadovaného zesílení celého C pásma. Nejvíce je zesílená část od vlnové délky přibližně 1545 nm do 1565 nm. Jsou to konkrétně kanály 20, 31 a 32. Nejvyšší hodnoty zesílení dosahují kanály 31 a 32 a hodnota zesílení se pohybuje přibližně kolem -20 dBm. Část od vlnové délky přibližně 1530 nm do 1545 nm je stále značně tlumena. Kanály 1 a 2 dosahují hodnot výkonu jen pouze kolem -45 dBm. To je dáno především nedostatečným výkonem pumpy (100 mW) pro toto vlákno.

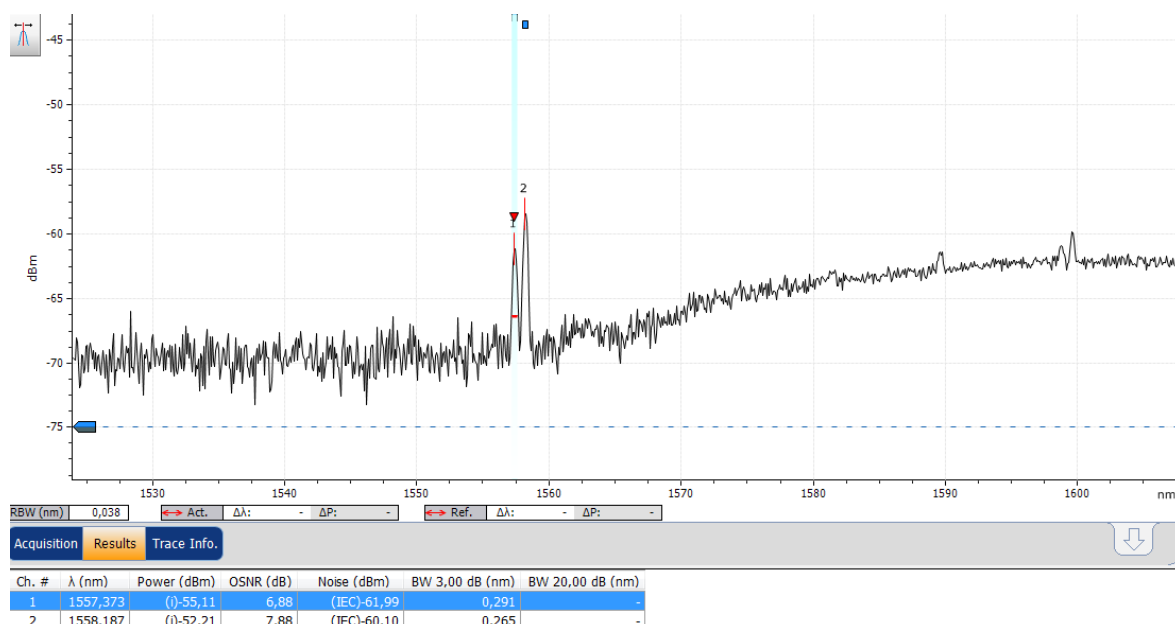
Na obrázku 72 (Obr. 72) můžeme pozorovat, že ani při pumpovacím výkonu 200 mW experimentální EDFA zesilovač nedosahuje rovnoměrného zesílení celého C pásma. Je zde stále patrný útlum v oblasti od vlnové délky 1530 do 1545 nm. Při výkonu pumpy 200 mW není rozdíl tak markantní jako v předchozím případě, ale přesto je stále rozpoznatelný. V tomto případě toto není zapříčiněno teplotou, která byla v obou jmenovaných případech 25°C, ale parametry Erbiem dopovaného vlákna SAE-1. Toto Erbiem dopované vlákno má velký vložný útlum a to 20 dB pro vlnovou délku 1530 nm a 10 dB pro vlnovou délku 980 nm. Nerovnoměrné zesílení je nejvíce patrné při pohledu na 32 kanál s maximálním zesílením a pohledu na 1 a 2 kanál s minimálním zesílením. Rozdíl mezi těmito krajními kanály je přibližně 15 dBm. Řešení pro odstranění tohoto nerovnoměrného zesílení je nastavení většího pumpovacího výkonu, který by dostatečněji vybudil Erbiem dopované vlákno SAE-1. V obrázcích z měření je také vidět malé zvýšení hodnoty výkonu na některých vlnových délkách v L pásmu. To je zapříčiněno odrazy na konektorech, které se poté mohou projevit zrcadlově v L pásmu, tak jak je tomu i v tomto měření.

Na obrázcích 73 a 74 (Obr. 73 a Obr. 74) je možné pozorovat, jak působí teplota, konkrétně 90°C, na Erbiem dopované vlákno SAE-1. Obrázky jsou opět ze spektrometru FTB-500 s modulem 7200D. Pro lepší porovnání byly data ze spektrometru zpracovány v programu Matlab a vykresleny společně do jednoho grafu. Lze tak lépe porovnat vliv teploty na Erbiem dopované vlákno SAE-1.

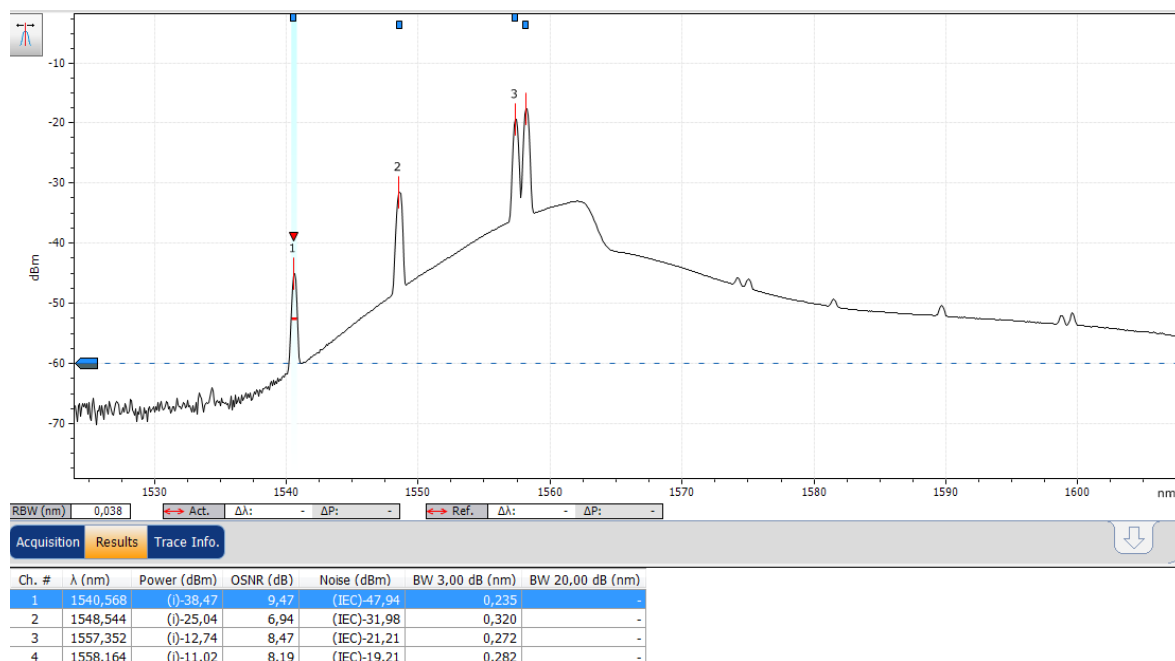
Na obrázku 75 (Obr. 75) je vykreslen graf při pumpovacím výkonu 100 mW a teploty 25°C a 90°C. Dále pro porovnání je v grafu znázorněna úroveň výkonu jednotlivých kanálů před vstupem do námi navrženého EDFA zesilovače. Na obrázku 75 (Obr. 75) je vidět, že se hodnota výkonu zvýšila nejvíce pro 31 a 32 kanál a to o 20 dBm. Pro ostatní kanály je hodnota výkonu menší kvůli křivce zesílení tohoto vlákna. Teplota 90°C způsobila snížení hodnoty výkonu signálu o 1-3 dBm.

Na obrázku 76 (Obr. 76) je vykreslen graf při pumpovacím výkonu 200 mW a teploty 25°C a 90°C. V tomto případě dosahuje zesílení pro 31 a 32 kanál hodnoty skoro 30 dBm. Pro ostatní kanály hodnoty zesílení klesají v závislosti křivky zesílení pro toto Erbiem dopované vlákno SAE-1. Vliv teploty 90°C je při vyšším výkonu pumpy méně patrný a pohybuje se 1-2 dBm. Snížení hodnoty výkonu vlivem teploty je pak nejvíce patrný v rozmezí vlnových délek 1530 až 1540 nm.

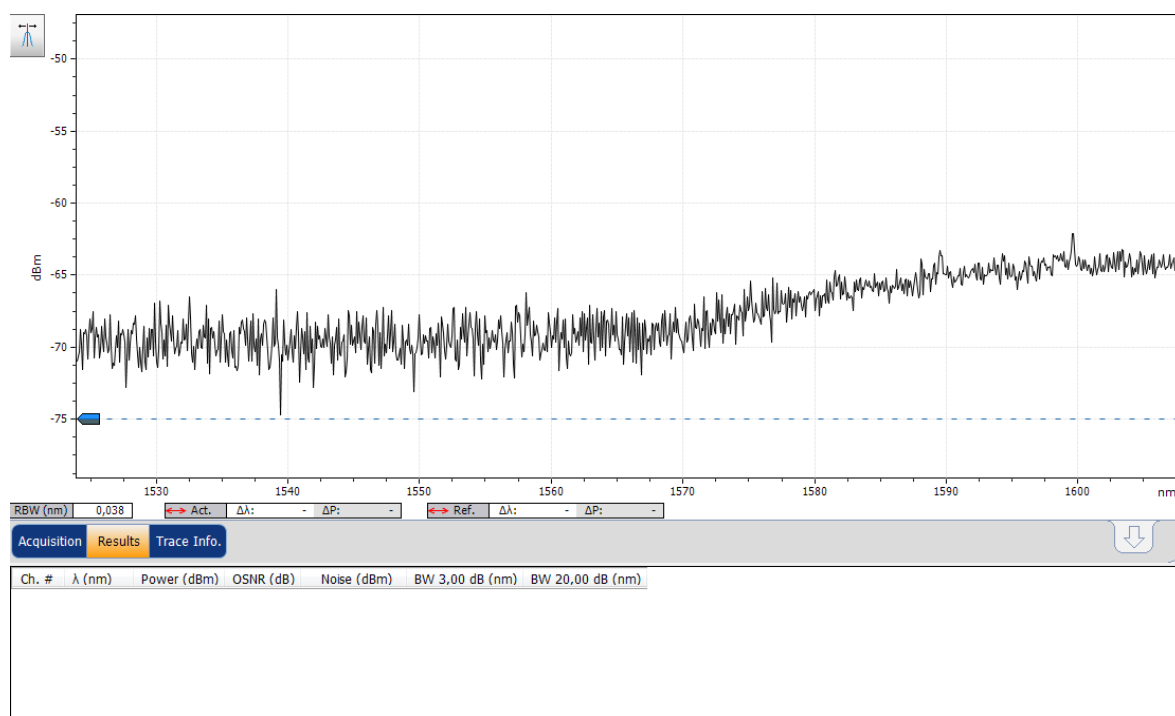
7.4.2. Experimentální Erbiem dopované vlákno SAE-2



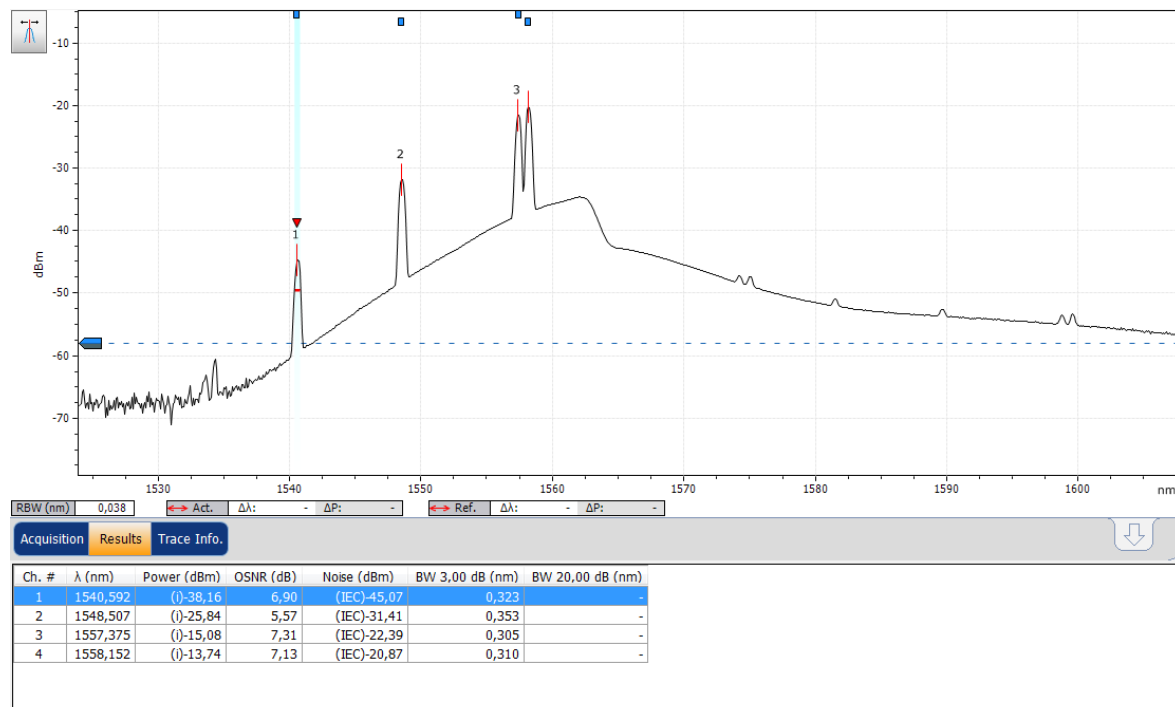
Obr. 77: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



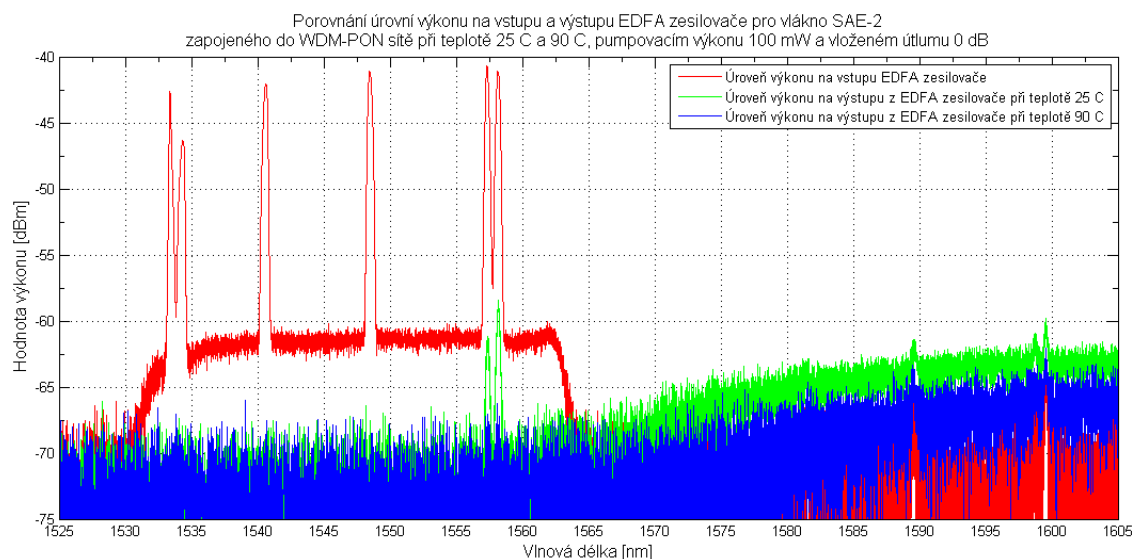
Obr. 78: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



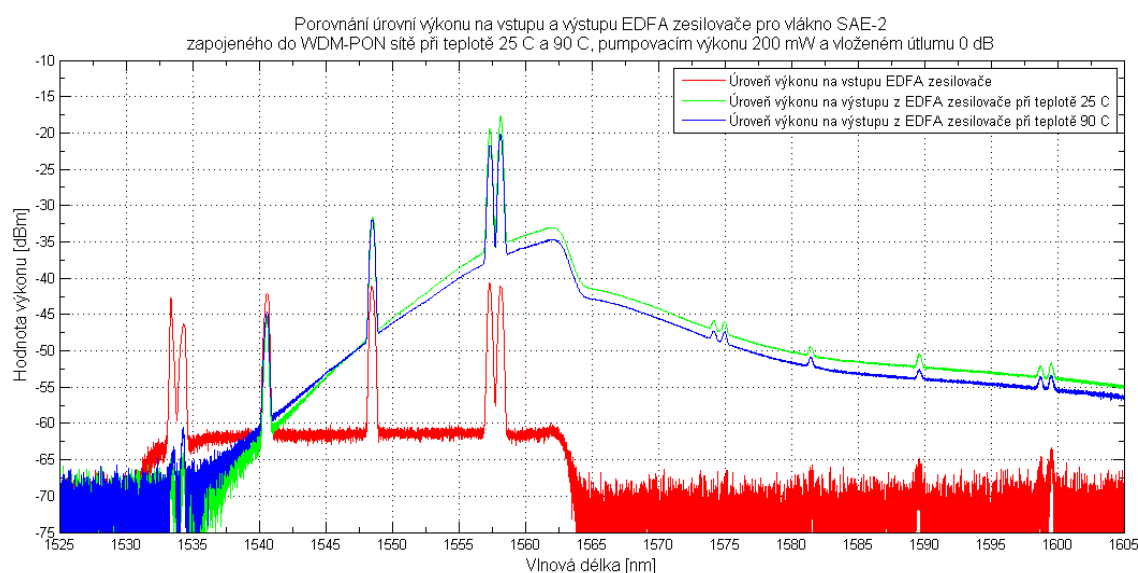
Obr. 79: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 80: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 81: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB



Obr. 82: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Na obrázcích (Obr. 77-80) jsou zobrazeny náměry z měření v experimentální síti WDM-PON s použitím Erbiem dopovaného vlákna SAE-2 při výkonech pumpy 100 mW a 200mW a při vystavení teplotám 25°C a 90°C. Tyto obrázky (Obr. 77-80) byly opět zhotoveny spektrometrem EXFO FTB-500 s modulem 7200D. Na obrázku 77 (Obr. 77) je možné vidět, že při pumpovacím výkonu 100 mW, experimentální EDFA zesilovač nedosahuje žádného zesílení v C ani L pásmu a naopak vstupní signál značně tlumí. To je dáno především nedostatečným výkonem pumpy (100 mW) pro toto vlákno SAE-2. Pumpovací výkon 100 mW je nedostatečný i z toho důvodu, že toto Erbiem dopované vlákno SAE-2 má vložný útlum pro vlnovou délku 1530 nm 30 dB a 15 dB pro vlnovou délku 980 nm. Pro zvrácení tlumícího efektu je nutné vyvinout větší pumpovací výkon. I přesto, že je výkon pumpy nedostatečný, můžeme na obrázku 77 (Obr. 77) vidět rozpoznatelné dva kanály a to kanál 31 a 32. Hodnoty výkonů těchto kanálů jsou rozpoznatelné, ale přesto se pohybují jen kolem hodnoty -60 dBm, což je skoro na úrovni šumu.

Na obrázku 78 (Obr 78) můžeme pozorovat, že při pumpovacím výkonu 200 mW už není C a L pásmo úplně utlumováno. Stále ovšem nedochází k dostatečnému pumpovacímu výkonu, tak aby bylo zajištěno dostatečné zesilování vstupního signálu. Maximální hodnoty jsou přibližně -20 dBm pro kanál 31 a 32. Dále pak hodnoty zesílení pro ostatní kanály prudce klesají a kanál 1 a 2 není vůbec rozeznatelný a je zcela utlumen. Rozdíl mezi 32 kanálem s nejvyšší hodnotou zesílení a kanálem 10 s nejnižší hodnotou zesílení je přibližně 25 dBm. Tento velký rozdíl je opět dán charakteristikou zesílení Erbiem dopovaného vlákna SAE-2, velkým vložným útlumem a nedostatečným pumpovacím výkonem pro toto vlákno. Nejen na obrázku 78 (Obr. 78) je možné vidět nepatrné zvýšení výkonu v L pásmu, které je zapříčiněno odrazy na konektorech.

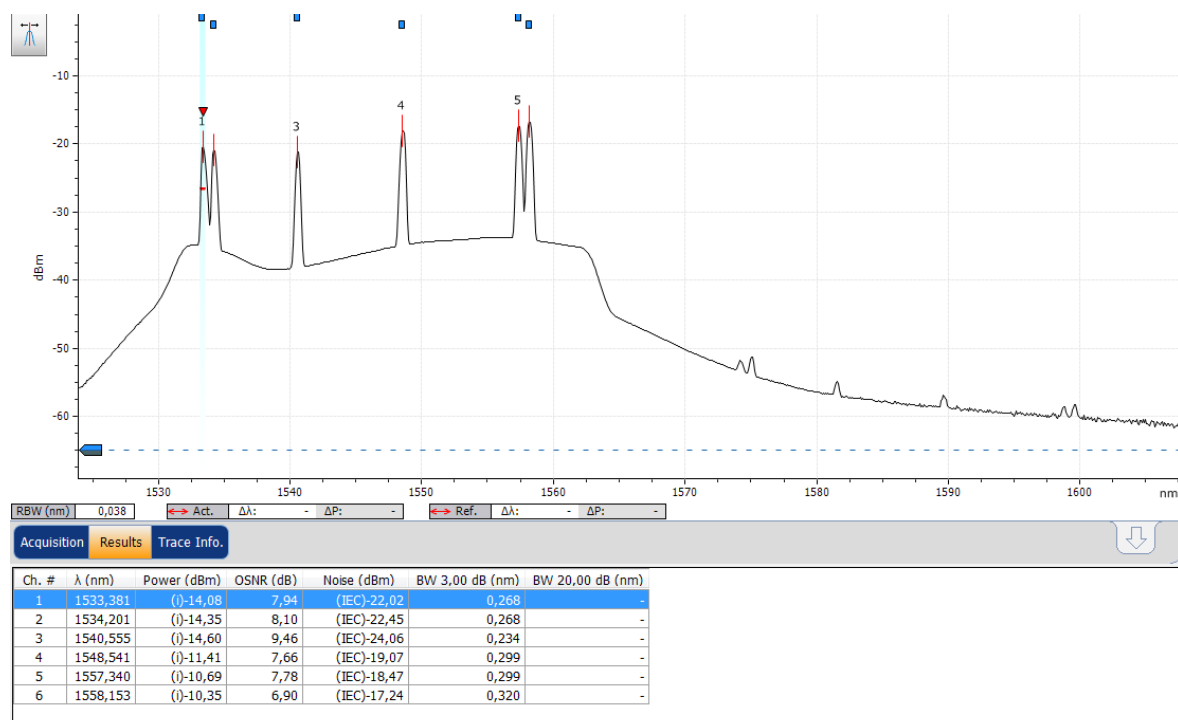
Na dalších obrázcích 79 a 80 (Obr 79 a Obr. 80) je dobře vidět vliv teploty na toto Erbiem dopované vlákno SAE-2. Na obrázku 79 (Obr. 79) je patrné, že teplota 90°C měla negativní dopad na zesílení a dále hodnotu výkonu tlumila. Toto je zřetelně vidět pro kanály 31 a 32, které byly při teplotě 25°C a pumpovacím výkonu 100 mW ještě rozeznatelné. Při teplotě 90°C a pumpovacím výkonu 100 mW byly úplně utlumeny a v grafu z měření už nejsou vůbec rozeznatelné a je možné vidět pouze šum mezi hodnotou výkonu -70 až -65 dBm. Útlum vlivem teploty 90°C byl znát i při pumpovacím výkonu 200 mW (Obr. 80). Hodnota výkonu klesla přibližně o 2-3 dBm vlivem teploty 90°C.

Na obrázcích 81 a 82 (Obr. 81 a Obr. 82) je nejlépe pozorovatelné, jak působí teplota, konkrétně 90°C, na Erbiem dopované vlákno SAE-1. Obrázky jsou opět ze spektrometru FTB-500 s modulem 7200D. Pro lepší porovnání byly data ze spektrometru zpracovány v programu Matlab a vykresleny opět společně do jednoho grafu. Lze tak lépe porovnat vliv teploty na Erbiem dopované vlákno SAE-2.

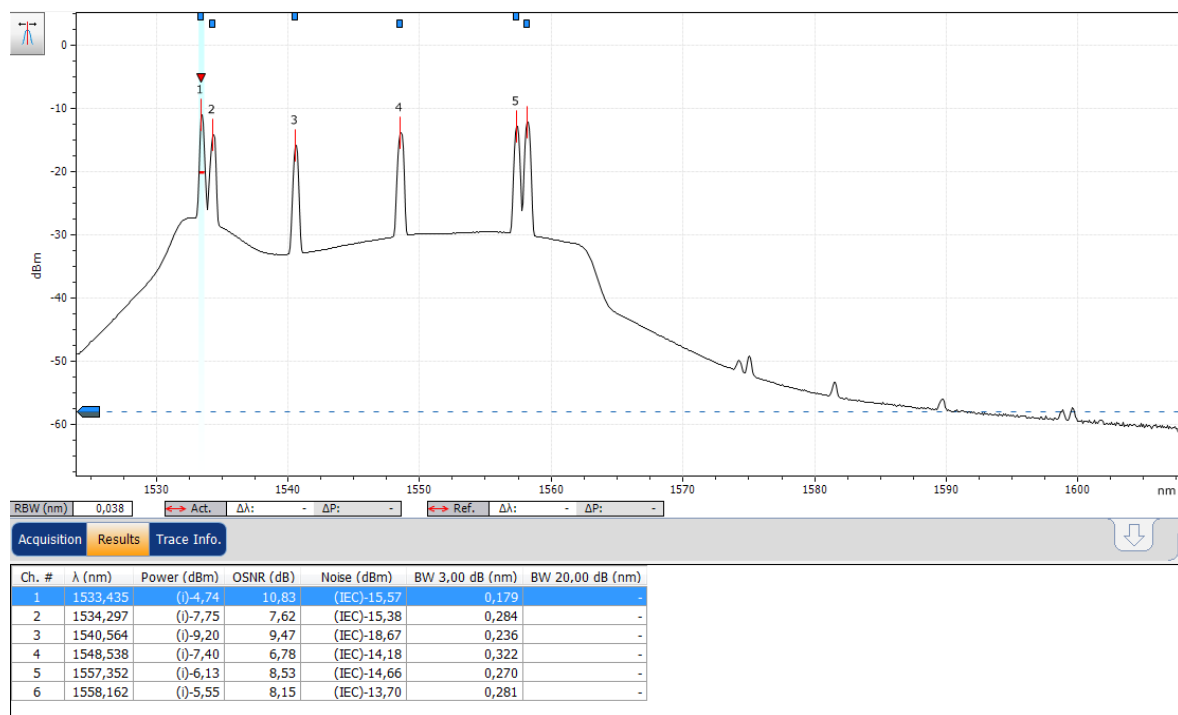
Na obrázku 81 (Obr. 81) je vykreslen graf při pumpovacím výkonu 100 mW a teploty 25°C a 90°C. Je zde opět znázorněna úroveň výkonu jednotlivých kanálů pro lepší porovnání před vstupem do námi navrženého EDFA zesilovače. Na obrázku 81 (Obr. 81) je pak vidět, jak je vstupní signál rapidně utlumen. Hodnota útlumu je větší než 25 dB a signál pak již není vůbec rozpoznatelný. Je zde taky patrné, že vlivem teploty 90°C už není rozeznatelný ani jeden kanál.

Na obrázku 82 (Obr. 82) je pak vykreslen graf při pumpovacím výkonu 200 mW a teploty 25°C a 90°C pro toto Erbiem dopované vlákno SAE-2. Z tohoto grafu je vidět, vliv teploty 90°C na vlákno SAE-2 a snížení hodnoty výkonu o 2-3 dBm vlivem teploty 90°C. Při celkovém porovnání s vstupní hodnotou signálu lze rozpoznat stále patrné úplné utlumení 1 a 2 kanálu.

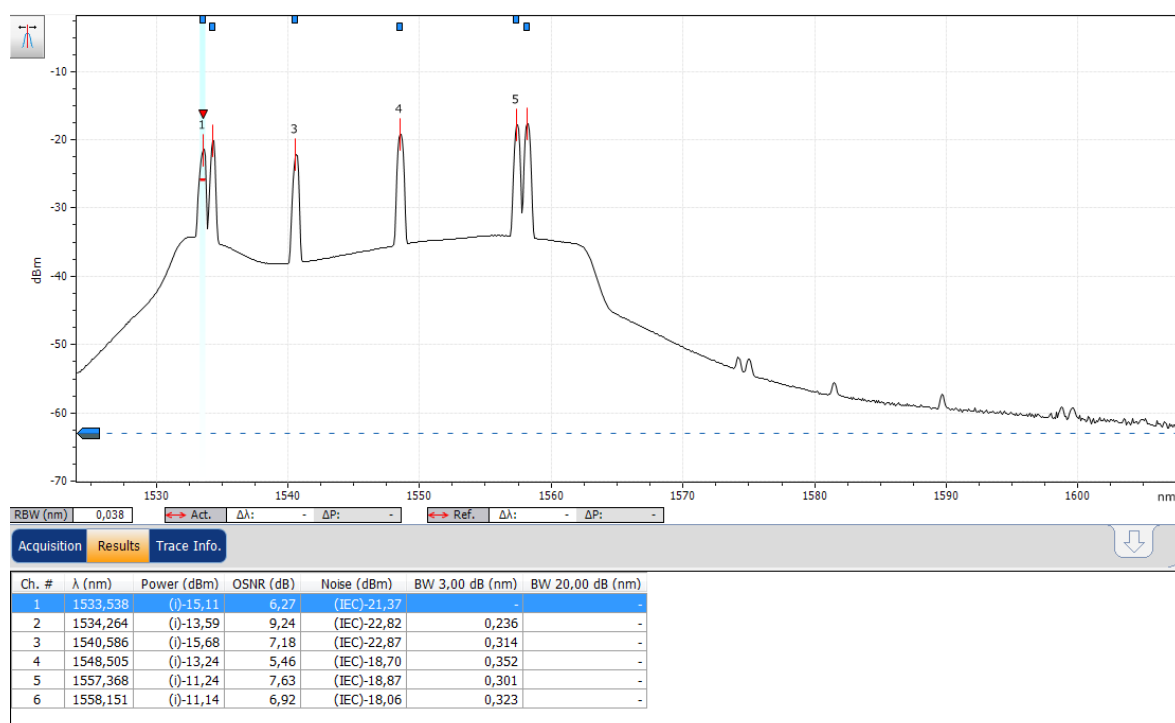
7.4.3. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-1



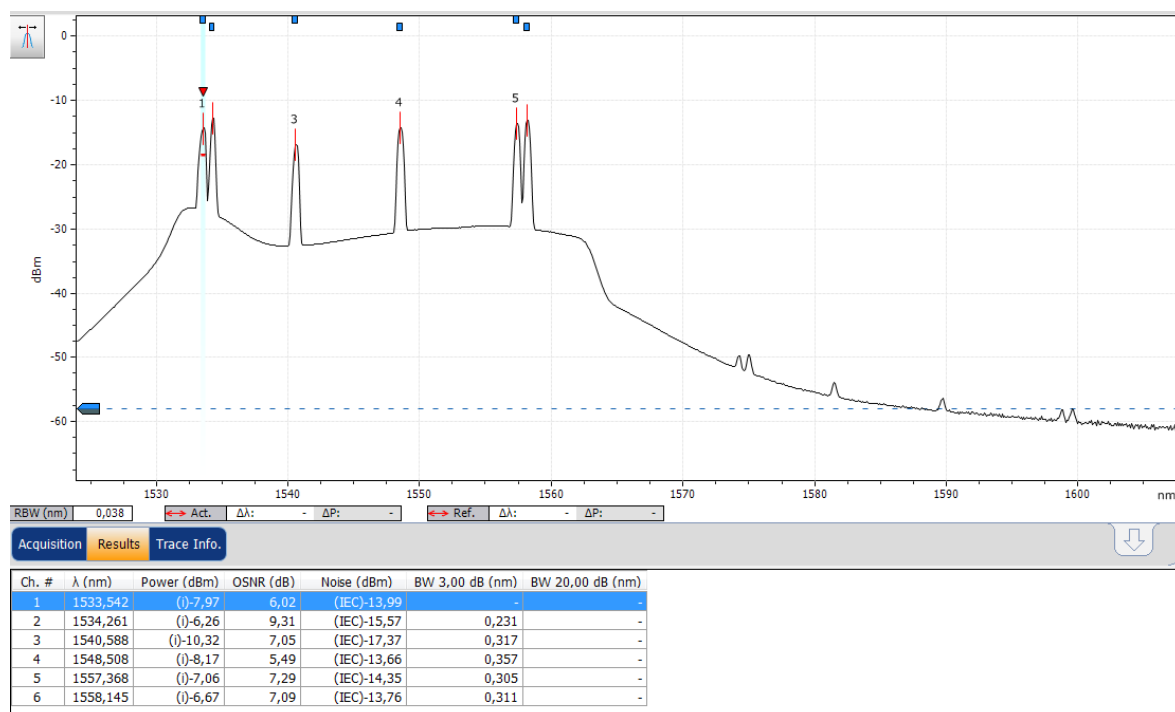
Obr. 83: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



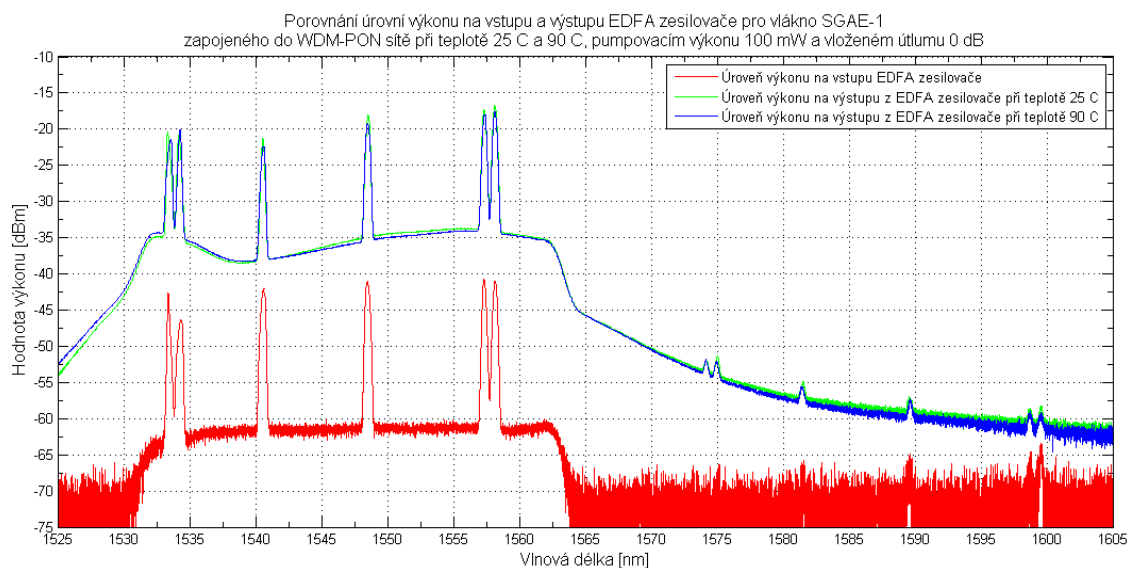
Obr. 84: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



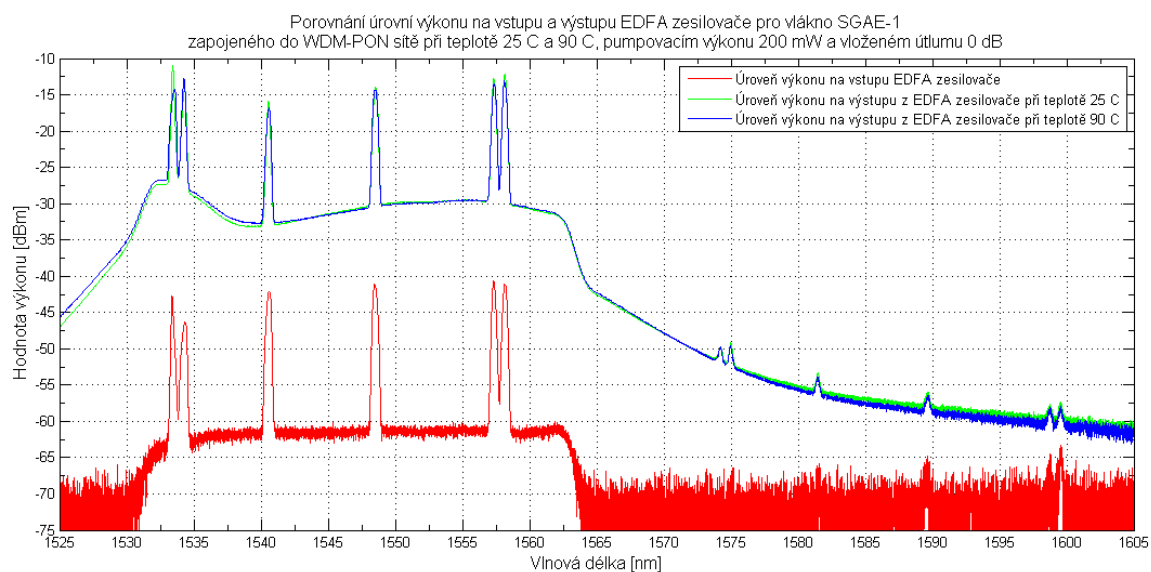
Obr. 85: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 86: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 87: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB



Obr. 88: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Na obrázcích (Obr. 83-86) jsou zobrazeny náměry z měření v experimentální síti WDM-PON s použitím Erbiem dopovaného vlákna SGAE-1 při výkonech pumpy 100 mW a 200mW a při vystavení teplotám 25°C a 90°C. Tyto obrázky (Obr. 83-86) byly opět zhotoveny spektrometrem EXFO FTB-500 s modulem 7200D. Na obrázku 83 (Obr. 83) můžeme pozorovat, že již při pumpovacím výkonu 100 mW experimentální EDFA zesilovač dosahuje významného zesílení v C pásmu. Hodnota výkonu je přibližně stejná a pohybuje se kolem hodnoty -20 dBm. Na obrázku 83 (Obr. 83) je patrné, že při výkonu pumpy 100 mW a teplotě 25 °C je zesílení lehce vyšší pro kanály 31 a 32 než pro kanály 1 a 2.

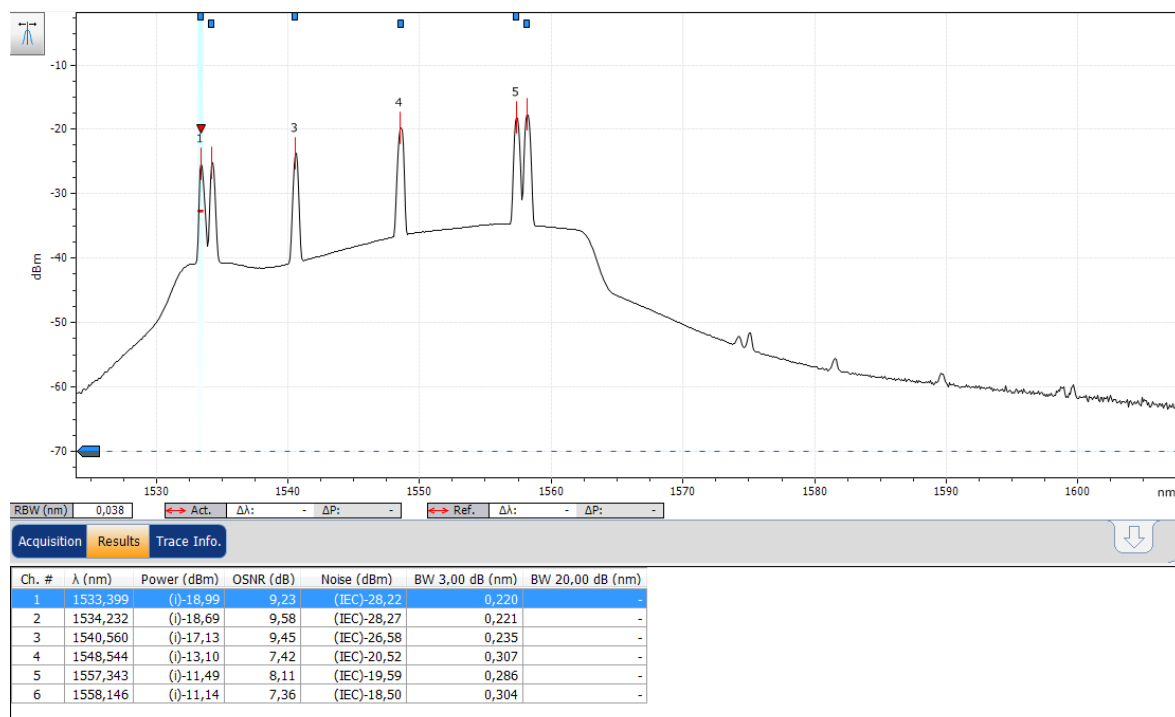
Na obrázku 84 (Obr 84) můžeme pozorovat, že při pumpovacím výkonu 200 mW experimentální EDFA zesilovač dosahuje opět skoro rovnoměrného zesílení celého C pásma jako v případě pumpovacího výkonu 100 mW. Při výkonu pumpy je však více patrné, že zde dochází k nárůstu zesílení a to hlavně pro kanál 1 a 2. Zesílení je ještě nepatrně větší než při porovnání s kanály 31 a 32. U kanálu 2 je zesílení přibližně 1 dBm a u kanálu 1 je hodnota zesílení přibližně 3 dBm. V obrázcích z měření je také vidět malé zvýšení hodnoty výkonu na některých vlnových délkách v L pásmu. To je zapříčiněno odrazy na konektorech, které se poté mohou projevovat zrcadlově v L pásmu, tak jak je tomu i v tomto měření.

Na obrázcích 85 a 86 (Obr. 85 a Obr. 86) je možné vidět působení teploty, a to konkrétně 90°C, na Erbiem dopované vlákno SGAE-1. U tohoto Erbiem dopovaného vlákna SGAE-1 nedochází k velkému ovlivnění hodnoty zesílení ani při vystavení teplotě 90°C. Je to možné poznat právě z obrázků 85 a 86 (Obr 85 a Obr. 86). Avšak pro lepší porovnání, obzvlášť v tomto případě, kdy jsou změny hodnoty zesílení vlivem teploty opravdu minimální, byly data ze spektrometru zpracovány v programu Matlab a vykresleny společně do jednoho grafu. Pak lze lépe porovnat vliv teploty na Erbiem dopované vlákno SGAE-1.

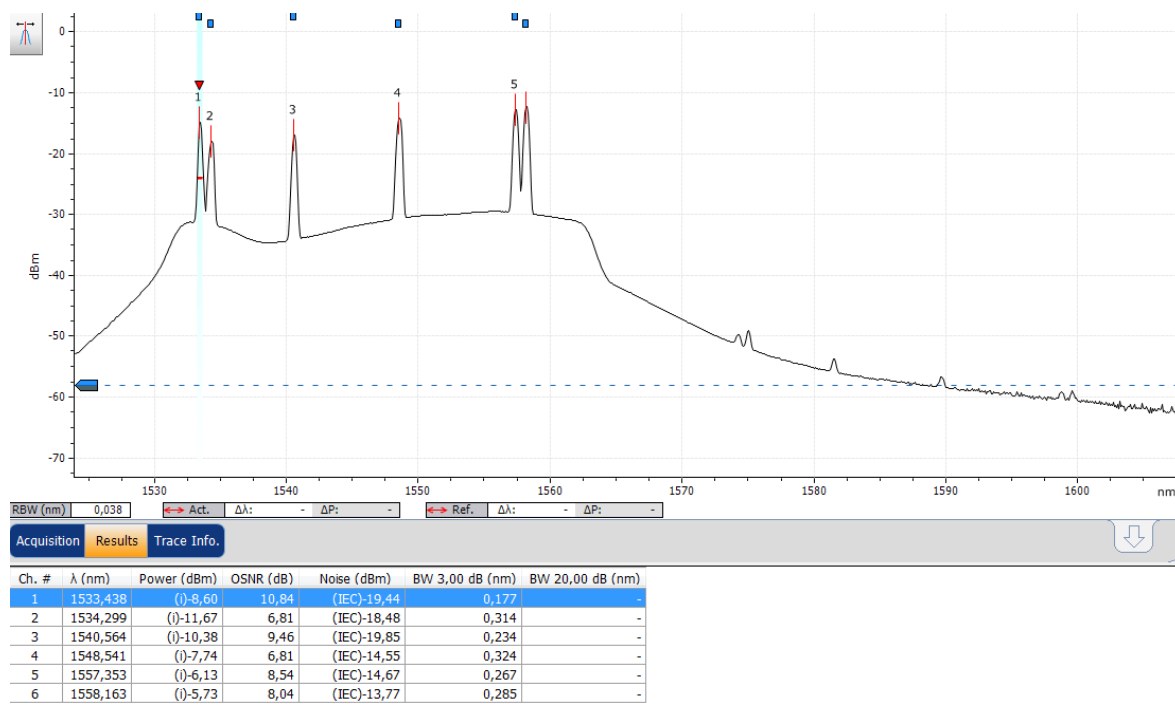
Na obrázku 87 (Obr. 87) můžeme pozorovat vliv teploty 25°C a 90°C při pumpovacím výkonu 100 mW. Je zde také znázorněna úroveň výkonu jednotlivých kanálů před vstupem do námi navrženého EDFA zesilovače pro snadnější porovnání. Při těchto výše uvedených parametrech dosahuje Erbiem dopované vlákno SGAE-1 zesílení přibližně 25 dBm a to skoro rovnoměrně pro všechny kanály. Tento výsledek je dán také tím, že toto vlákno SGAE-1 má nízký vložný útlum a to konkrétně 10 dB pro vlnovou délku 1530 nm a 5 dB pro vlnovou délku 980 nm. Co se týče vlivu teploty na toto Erbiem dopované vlákno SGAE-1, je z obrázku 87 (Obr. 87) patrné, že je minimální. Útlum způsobený vlivem teploty 90°C se pohybuje jen kolem 1 dBm.

Na obrázku 88 (Obr. 88) je vykreslen graf při pumpovacím výkonu 200 mW a teplotě 25°C a 90°C. Na obrázku 88 (Obr. 88) je možné porovnat zesílení před vstupem do námi navrženého zesilovače a na výstupu ze zesilovače. Při pumpovacím výkonu 200 mW dosahuje hodnota výkonu přibližně -14 dBm. Při porovnání s hodnotou výkonu před vstupem do EDFA zesilovače byl signál zesílen o přibližně 27 dBm. U kanálu 1 a 2 byla úroveň hodnoty zesílení ještě o pár dBm vyšší. Na obrázku 88 (Obr. 88) je možné vidět, že i při teplotě 90°C, došlo jen k malému utlumení hodnoty výkonu a to o 1-2 dBm. Pro kanál 1, který byl více zesílen, došlo vlivem teploty k útlumu o 3 dBm.

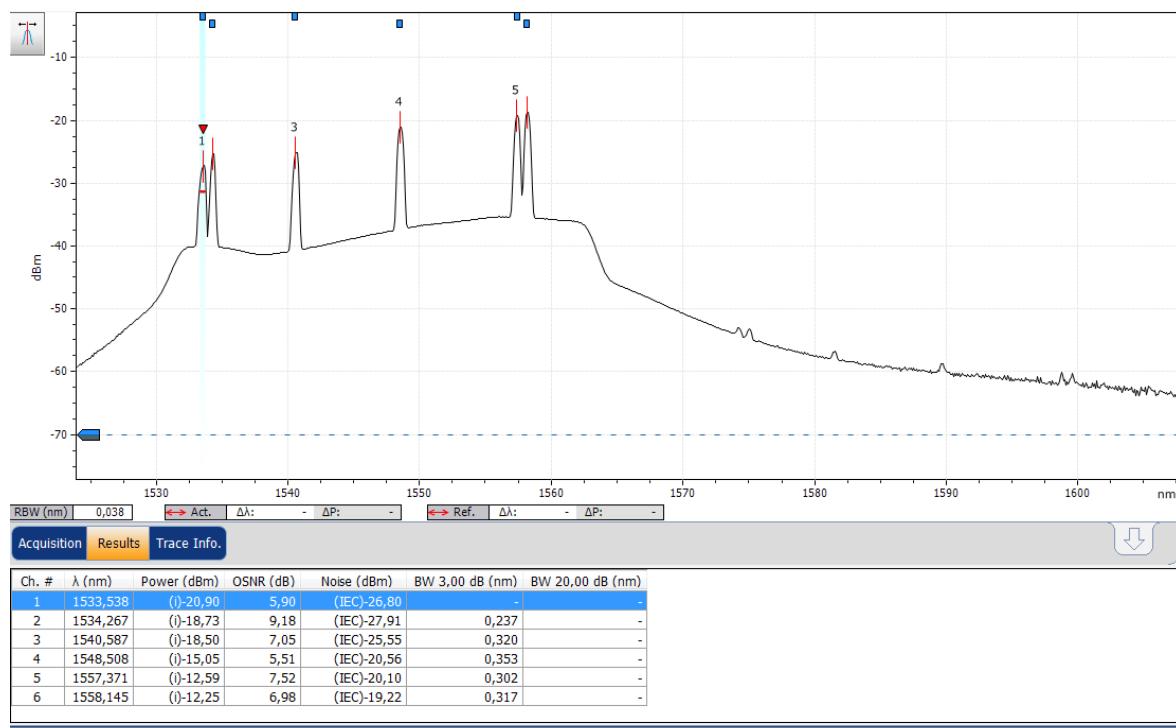
7.4.4. Experimentální Erbiem dopované vlákno SGAE-2



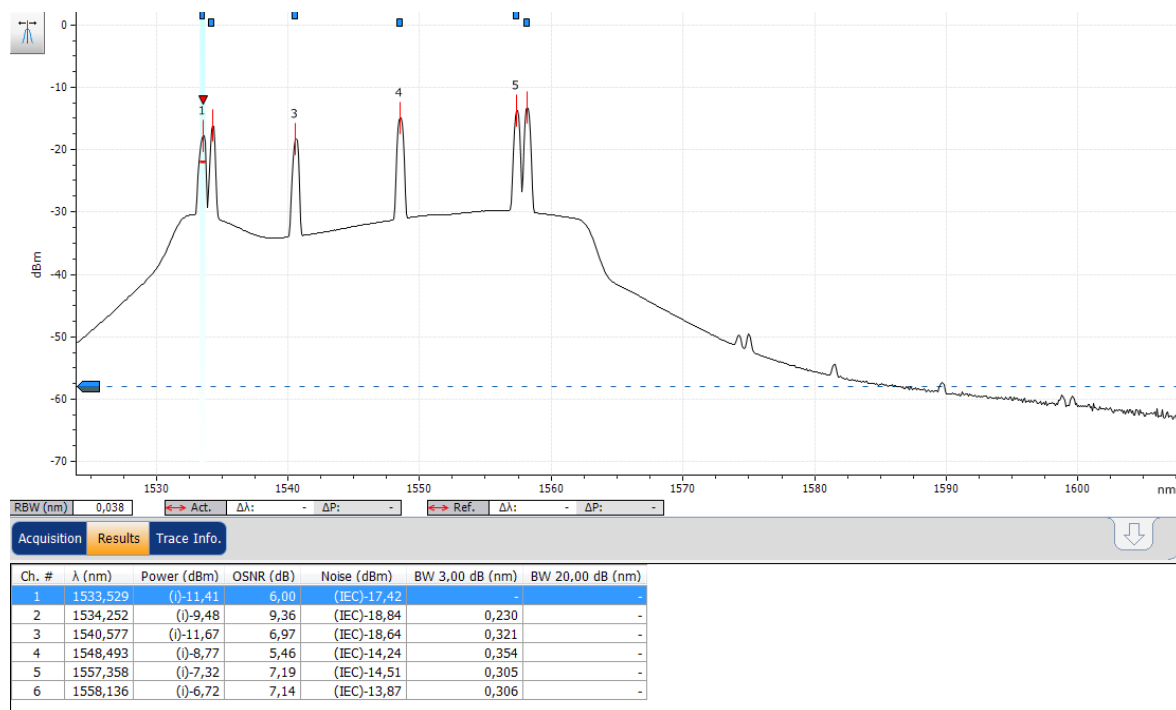
Obr. 89: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



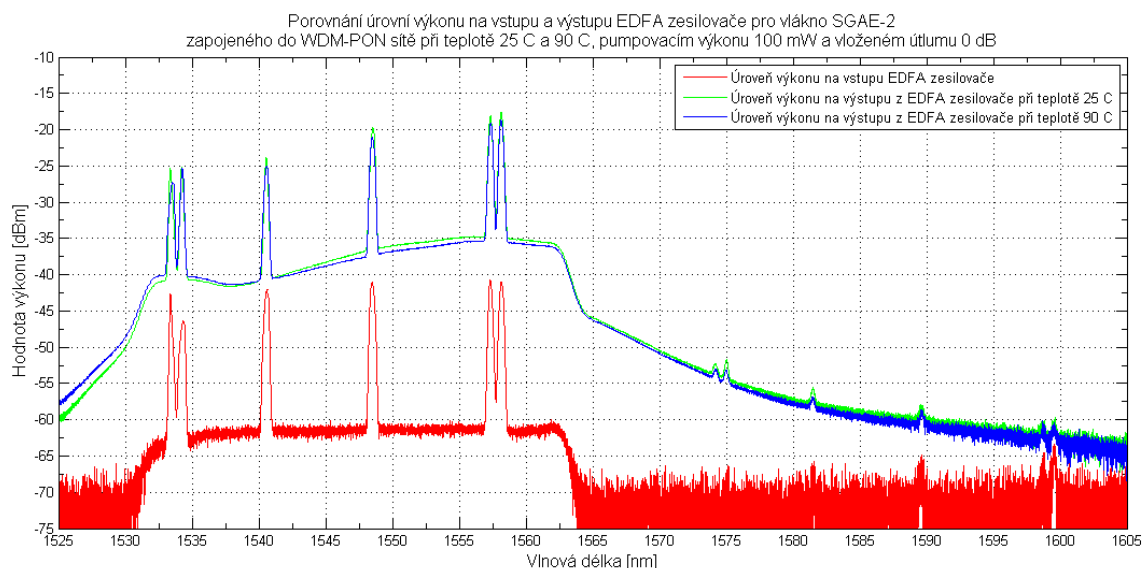
Obr. 90: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



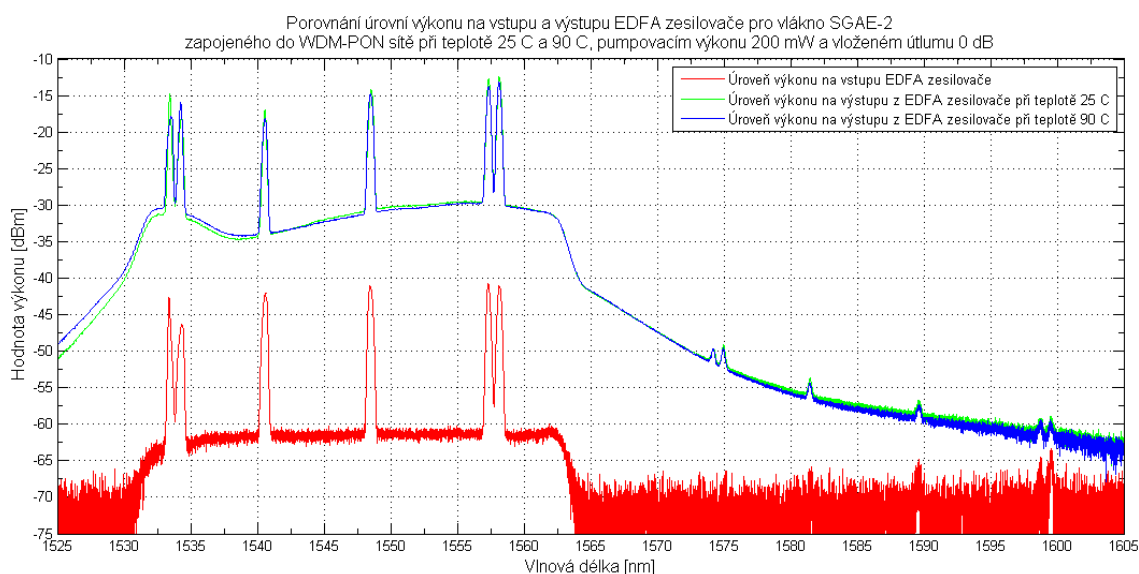
Obr. 91: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 92: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB



Obr. 93: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB



Obr. 94: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Na obrázcích (Obr. 89-92) jsou zobrazeny náměry z měření v experimentální síti WDM-PON s použitím Erbiem dopovaného vlákna SGAE-2 při výkonech pumpy 100 mW a 200mW a při vystavení teplotám 25°C a 90°C. Tyto obrázky (Obr. 89-92) byly opět zhotoveny spektrometrem EXFO FTB-500 s modulem 7200D. Na obrázku 89 (Obr. 89) lze vidět, že již při pumpovacím výkonu 100 mW experimentální EDFA zesilovač dosahuje významného zesílení v C pásmu. Celková charakteristika křivky zesílení je velice podobná jako v případě vlákna SGAE-1. Hodnota výkonu se pohybuje přibližně kolem hodnoty -20 dBm pro kanály 31 a 32. Pro kanál 2 je to jen -25 dBm a pro kanál 1 je hodnota výkonu ještě o něco málo nižší a to 27,5 dBm. Tento větší útlum i při porovnání s Erbiem dopovaným vláknem SGAE-1 je způsoben větším vložným útlumem vlákna SGAE-2, kde pro vlnovou délku 1530 nm je hodnota vložného útlumu 12 dB a pro vlnovou délku 980 nm je hodnota vložného útlumu 6 dB. V obrázcích z měření je také vidět malé zvýšení hodnoty výkonu na některých vlnových délkách v L pásmu. To je způsobeno opět odrazy na konektorech, které se poté mohou projevit zrcadlově v L pásmu, tak jak je tomu i v tomto měření.

Na obrázku 90 (Obr 90) můžeme pozorovat, že při pumpovacím výkonu 200 mW experimentální EDFA zesilovač dosahuje opět skoro rovnoměrného zesílení celého C pásma jako v případě pumpovacího výkonu 100 mW a můžeme si také povšimnout, že charakteristika křivky zesílení je skoro totožná jako v případě vlákna SGAE-1. Při výkonu pumpy 200 mW je i zde opět více patrné, že zde dochází k nárůstu zesílení a to především pro kanál 31 a 32. Hodnota zesílení je pro kanál 31 a 32 -12,5 dBm.

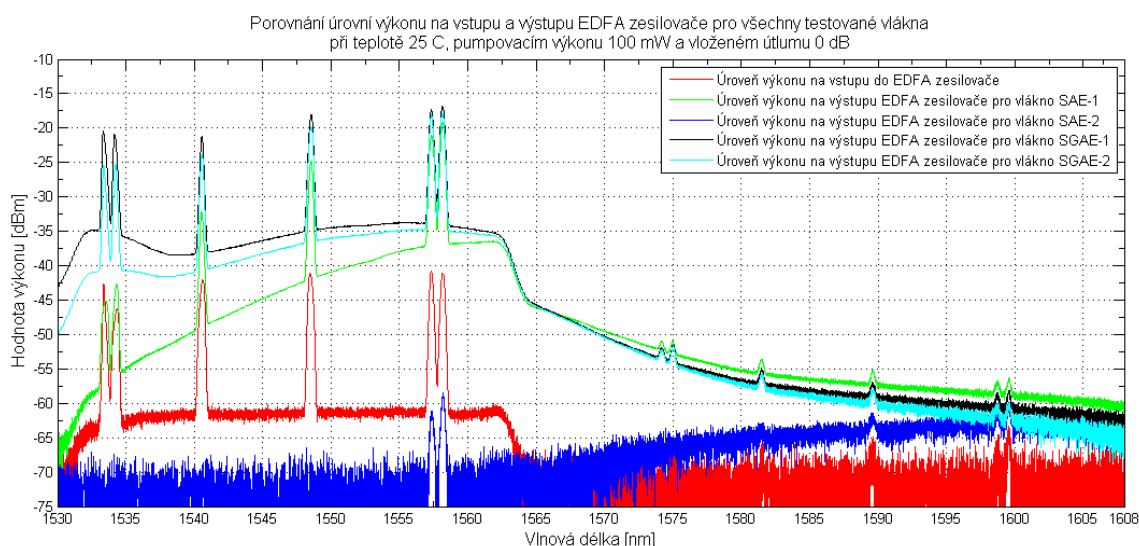
Na obrázcích 91 a 92 (Obr. 91 a Obr. 92) je možné pozorovat působení teploty 90°C, na Erbiem dopované vlákno SGAE-2. U tohoto Erbiem dopovaného vlákna SGAE-2 nedochází k velkému ovlivnění hodnoty zesílení ani při vystavení teplotě 90°C. Charakteristika křivky zesílení při působení teploty 90°C je velmi podobná jako pro Erbiem dopované vlákno SGAE-1. Rozdíly při působení teploty 90°C jsou opět více patrné, pokud jsou data ze spektrometru zpracovány v programu Matlab a vykresleny společně do jednoho grafu. Pak lze snadněji porovnat vliv teploty na Erbiem dopované vlákno SGAE-2.

Na obrázku 93 (Obr. 93) lze vidět, že již při pumpovacím výkonu 100 mW a teplotě 25°C a 90°C dosahuje Erbiem dopované vlákno SGAE-2 zesílení přibližně 20 dBm. Co se týče vlivu teploty na toto Erbiem dopované vlákno SGAE-2 je z obrázku 93 (Obr. 93) patrné, že je opět minimální jako v případě Erbiem dopovaného vlákna SGAE-1. Útlum způsobený vlivem teploty 90°C se pohybuje jen kolem 1-2 dBm. Větší útlum kolem 3 dBm je pak pro kanál 1.

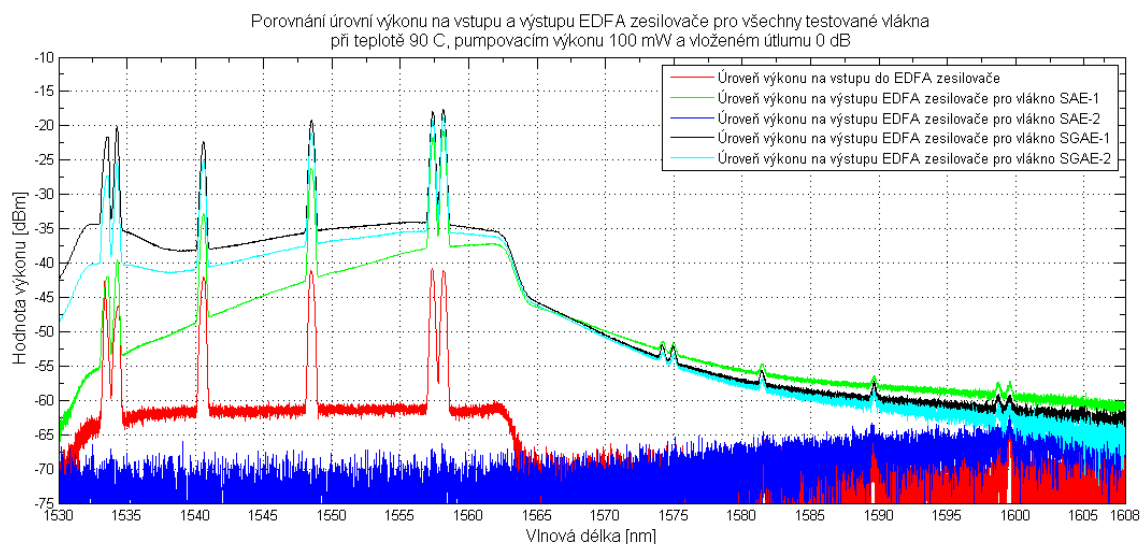
Na obrázku 94 (Obr. 94) je vykreslen graf při pumpovacím výkonu 200 mW a teplotě 25°C a 90°C. Na obrázku 94 (Obr. 94) lze vidět porovnání zesílení před vstupem do námi navrženého zesilovače a na výstupu ze zesilovače. Celková hodnota zesílení je přibližně 30 dBm. Při pumpovacím výkonu 200 mW dosahuje hodnota výkonu pro kanály 31 a 32 přibližně -12,5 dBm. Pro kanály 1 a 2 je hodnota nižší a to přibližně 15 dBm. Nejnižší hodnotu výkonu -17,5 dBm dosahuje kanál 10. Na obrázku 94 (Obr. 94) je možné vidět, že i při teplotě 90°C došlo jen k malému utlumení hodnoty výkonu a to o 1-2 dBm. Pro kanál 1 došlo vlivem teploty k většímu útlumu a to o 3 dBm.

7.5. Vzájemné porovnání výsledků hodnoty zesílení experimentálních Erbiem dopovaných vláken

Pro potřeby porovnání jednotlivých vláken a pro umožnění lepšího vyhodnocení naměřených dat byly vlákna dále porovnána mezi sebou. Výsledky tohoto porovnání byly zpracovány do jednotlivých grafů (Obr. 95-98), které jsou zobrazeny níže.



Obr. 95: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB



Obr. 96: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB

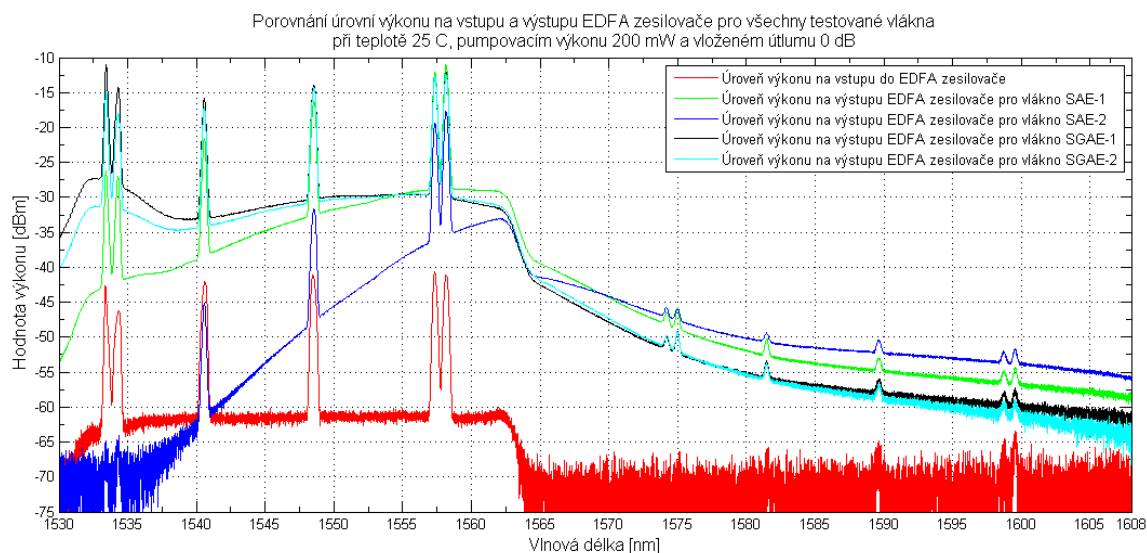
Experimentální Erbiem dopovaná vlákna byly nejprve porovnány mezi sebou při teplotě 25°C a výkonu pumpy 100 mW. Na obrázku 95 (Obr. 95) lze pozorovat, že při těchto parametrech měření dosáhlo nejlepší úrovně zesílení Erbiem dopované vlákno SGAE-1. Hodnota zesílení se pro jednotlivé kanály pohybuje v rozmezí 20 až 25 dBm.

U Erbiem dopovaného vlákna SGAE-2 je možné pozorovat podobnou křivku zesílení jako u vlákna SGAE-1. Při porovnání úrovně zesílení však Erbiem dopované vlákno SGAE-2 dosahuje o něco horších výsledků než vlákno SGAE-1. Jedná se o rozdíl 2-3 dBm pro vlnové délky 1540 nm až 1565 nm. Pro vlnové délky 1530 nm až 1540 nm je větší a to konkrétně o 5-6 dBm oproti Erbiem dopovanému vláknu SGAE-1.

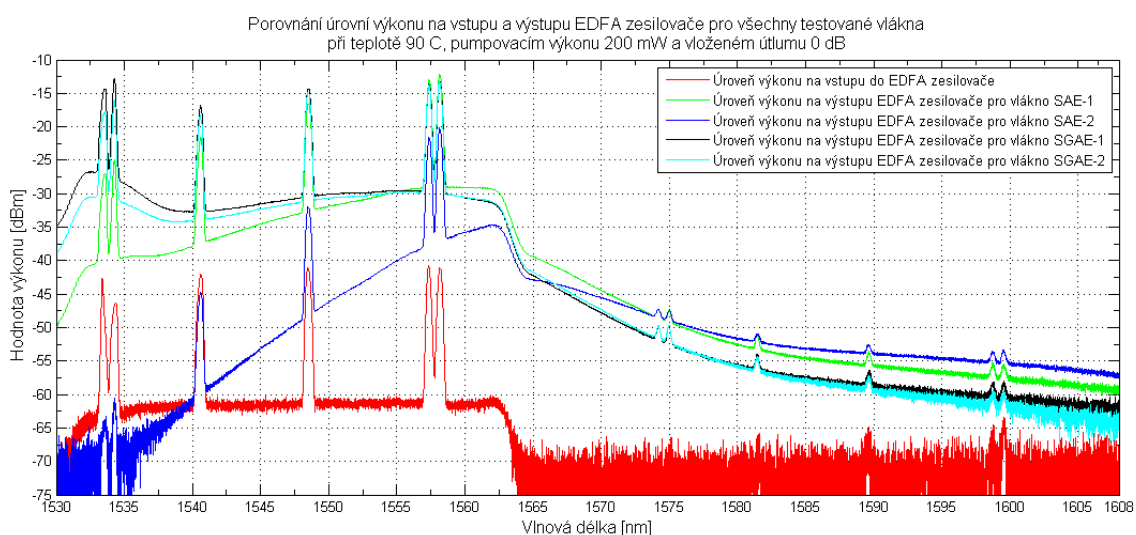
Pokud se podíváme blíže na Erbiem dopované vlákno SAE-1, můžeme si povšimnout, že křivka zesílení je kompletně odlišná od výše popisovaných vláken SGAE-1 a SGAE-2. Z křivky zesílení je patrné, že Erbiem dopované vlákno SAE-1 není dostatečně vybuzeno, aby mohlo adekvátně zesilovat signál v celém C pásmu. Na obrázku 95 (Obr. 95) lze vidět, že nejvíc se toto nedostatečné vybuzení projevuje pro vlnové délky 1530 nm až 1540 nm, kde při porovnání s vlákny SGAE-1 a SGAE-2 je patrný velký rozdíl v úrovni zesílení. Nedostatečné zesílení tohoto Erbiem dopovaného vlákna SAE-1 je dáno dvěma faktory. Za prvé velkým vloženým útlumem samotného vlákna, pro vlnovou délku 980 nm je to 10 dB a pro vlnovou délku 1530 nm je to dokonce 20 dB. Za druhé je to způsobeno nedostatečným výkonem pumpy pro toto vlákno.

Co se týče Erbiem dopovaného vlákna SAE-2 lze pozorovat, že zesilovací schopnost vlákna je úplně utlumena. V porovnání s ostatními vlákny a také při porovnání s hodnotou výkonu na vstupu EDFA zesilovače je na obrázku 95 (Obr. 95) jasně vidět, že toto vlákno SAE-2 signál utlumuje a to v celém C pásmu. Toto je dáno, podobně jako v případě vlákna SAE-1 hodnotou vloženého útlumu samotného vlákna a také nedostatečným výkonem pumpy pro toto vlákno. Hodnota vloženého útlumu je pro vlákno SAE-2 pro vlnovou délku 980 nm 15 dB a pro vlnovou délku 1530 nm dokonce 30 dB.

Na obrázku 96 (Obr. 96) lze vidět porovnání jednotlivých Erbiem dopovaných vláken při výkonu pumpy 100 mW a při vystavení teplotě 90°C. Při porovnání lze vidět, že teplota 90°C utlumovala úroveň výkonu skoro stejně a to pro všechny Erbiem dopovaná vlákna přibližně o 1-3 dBm. U Erbiem dopovaného vlákna SAE-2 lze pozorovat, že teplota způsobila ještě větší útlum a to jak v C pásmu, kde nejsou patrné už ani poslední dva kanály, tak i v L pásmu, které je také ještě více utlumeno.



Obr. 97: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB



Obr. 98: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB

Experimentální Erbiem dopovaná vlákna byly dále porovnány mezi sebou při teplotě 25°C a výkonu pumpy 200 mW. Na obrázku 97 (Obr. 97) lze vidět, že při těchto parametrech měření dosáhlo nejlepší úrovně zesílení opět Erbiem dopované vlákno SGAE-1. Hodnota zesílení se pro jednotlivé kanály pohybuje v rozmezí 25 až 30 dBm.

Pro Erbiem dopované vlákno SGAE-2 je možné pozorovat podobnou křivku zesílení jako u vlákna SGAE-1. Lze si také všimnout podobného nárůstu úrovně zesílení v rozmezí vlnových délek 1530 nm až 1535 nm. Při porovnání úrovně zesílení však Erbiem dopované vlákno SGAE-2 dosahuje opět o něco horších výsledků než vlákno SGAE-1. V tomto případě se jedná o rozdíl 2-4 dBm pro vlnové délky 1530 nm až 1540 nm. Pro vlnové délky 1540 nm až 1565 nm je rozdíl úrovně zesílení přibližně stejný v porovnání s Erbiem dopovaným vláknem SGAE-1.

Další k porovnání je Erbiem dopované vlákno SAE-1. Z křivky zesílení je patrné, že Erbiem dopované vlákno SAE-1 není stále dostatečně vybuzeno, aby mohlo stejnoměrně zesilovat signál v celém C pásmu. Na obrázku 97 (Obr. 97) lze vidět, že nejvíc se tento rozdíl projevuje pro vlnové délky 1530 nm až 1540 nm, kde při porovnání s vlákny SGAE-1 a SGAE-2 je patrný rozdíl v úrovni zesílení. Nedostatečné zesílení tohoto Erbiem dopovaného vlákna SAE-1 je dáno, jak už bylo výše zmíněno, nedostatečným výkonem pumpy pro toto vlákno a také větším vloženým útlumem samotného Erbiem dopovaného vlákna SAE-1

Erbium dopované vlákno SAE-2 již dosahuje lepší úrovně zesílení než při výkonu pumpy 100 mW. Avšak v porovnání s ostatními vlákny a také při porovnání s hodnotou výkonu na vstupu EDFA zesilovače je na obrázku 97 (Obr. 97) jasně vidět, že toto vlákno SAE-2, i přes vyšší výkon pumpy, signál stále utlumuje. Nejvíce je toto patrné pro kanály, které se nacházejí mezi vlnovou délkou 1530 nm až 1545 nm. Kanály 1 a 2 nejsou vůbec rozeznatelné a kanál 10 je také lehce utlumen. Důvod tohoto neadekvátního zesílení je především, jak již bylo zmíněno výše, velký vložený útlum samotného vlákna.

Jako poslední je porovnání vláken při výkonu pumpy 200 mW a při vystavení teplotě 90°C. Na obrázku 98 (Obr. 98) je zobrazeno toto porovnání Erbiem dopovaných vláken. Při porovnání lze vidět, že teplota 90°C utlumovala úroveň výkonu skoro stejně a to pro všechny Erbiem dopovaná vlákna přibližně o 1-3 dBm. V některých případech je možné si povšimnout, že pro některé kanály zvláště mezi vlnovými délkami 1530 nm až 1540 nm došlo k mírnému zlepšení úrovně zesílení o 1-2 dBm.

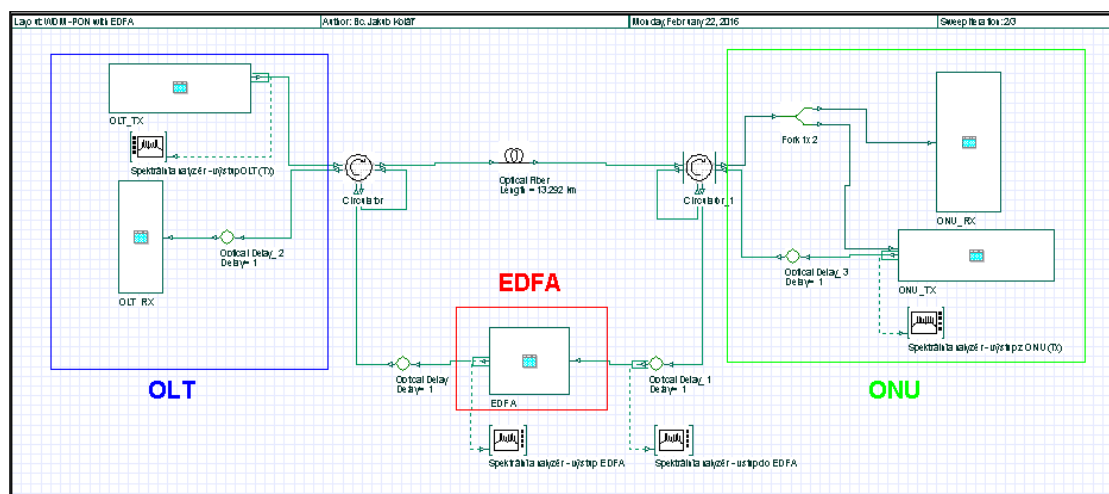
8. Simulace vlastností topologie WDM-PON sítě se zapojením experimentálních Erbiem dopovaných vláken v aplikaci Optiwave

Další bod této diplomové práce, zahrnuje vytvoření WDM-PON sítě co nejvíc totožné s reálnou sítí WDM-PON v laboratoři EB316 na které probíhalo praktické měření. Tato síť je vytvořena v programu Optiwave OptiSystem 14.

Optiwave OptiSystem 14 je simulační program, s jehož pomocí lze navrhovat a posléze i testovat chování různých druhů optických sítí nebo komponent. Je tak možné pozorovat chování dané sítě a provádět následné optimalizace. Testování probíhalo na nejnovější verzi Optiwave OptiSystem 14.

8.1. Topologie WDM-PON sítě

Nejprve bylo nutné v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14 sestavit WDM-PON síť, která bude totožná s WDM-PON sítí sestavené při reálném měření v laboratoři EB316. Na obrázku 99 (Obr. 99) níže je zobrazeno schéma celé této WDM-PON sítě, vytvořené v aplikaci Optiwave.

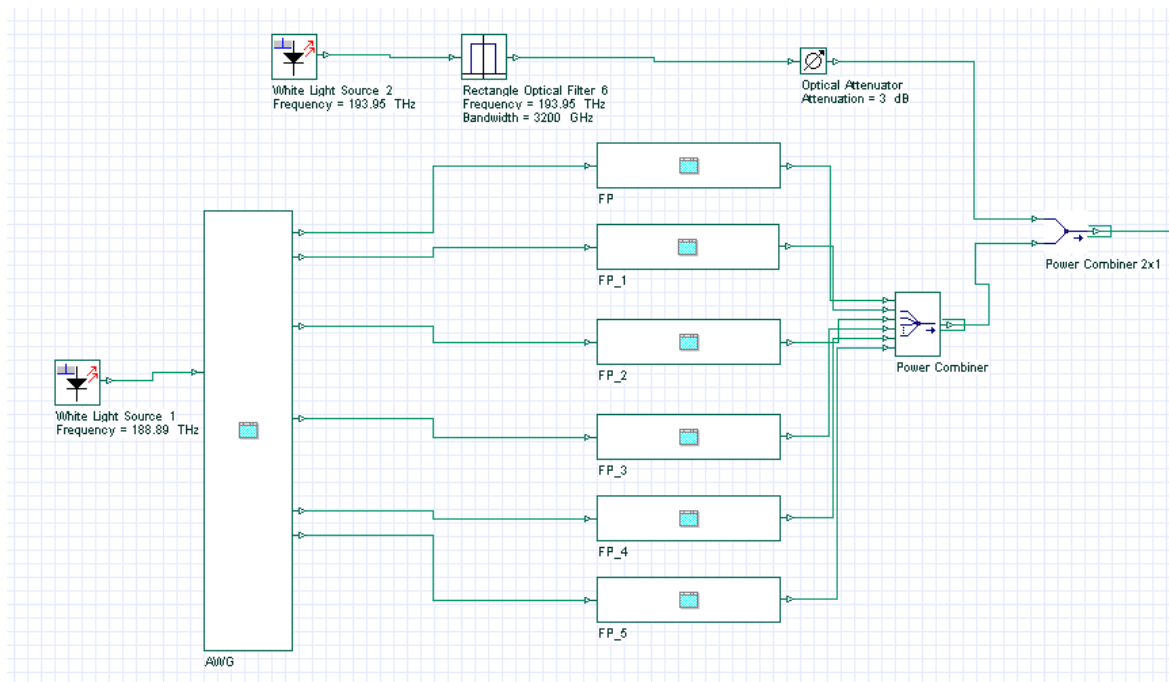


Obr. 99: Schéma navržené WDM-PON sítě

Na obrázku 99 (Obr. 99) lze vidět, že navrženou síť WDM-PON můžeme rozdělit do třech bloků. První blok představuje jednotku OLT (modré orámování) a je rozdělen na dvě podčásti. Vysílací část OLT jednotky s názvem OLT_TX a přijímací část jednotky OLT s názvem OLT_RX. Další blok představuje samotná přenosová trasa, na které je ve vzestupném směru umístěn námi navržený experimentální EDFA zesilovač, ke kterému jsou připojeny dva spektrální analyzátory. Jeden je umístěn před experimentální EDFA zesilovač tak, aby bylo možné zjistit, stejně jako v případě reálného testování v laboratoři EB316, jaká je hodnota úrovně signálu na vstupu do EDFA zesilovače. Druhý je pak umístěn na výstupu s EDFA zesilovače z důvodu porovnání hodnoty úrovně signálu před a po zesílení a následné vyhodnocení celkového zesílení. Poslední část této sítě se skládá z ONU jednotek. ONU jednotka má dvě části podobně jako v případě OLT. První část je část vysílací s názvem ONU_TX. Druhá pak přijímací část ONU jednotky s názvem ONU_RX. V následujících kapitolách je detailněji rozebráno nastavení a parametry jednotlivých částí a použitých komponent. Všechny zdrojové soubory pro aplikaci Optiwave OptiSystem 14 lze nalézt v příloze E.

8.1.1. OLT jednotka

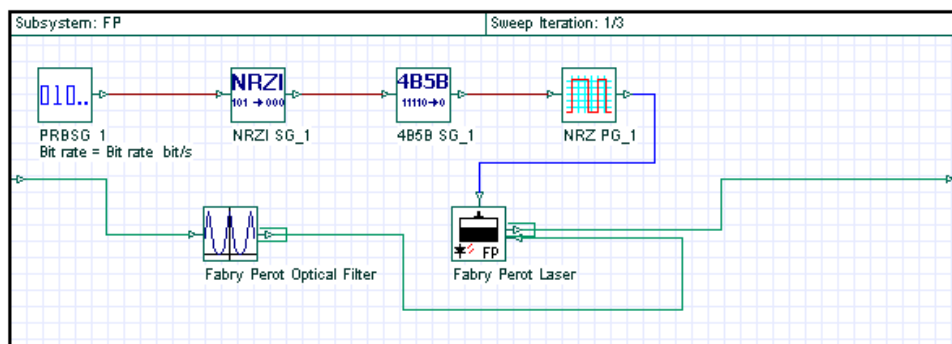
Jednotka OLT byla navržena tak, aby co nejvíce odpovídala parametrům použité OLT jednotky EAST 1110, která byla použita pro reálná měření v laboratoři EB316. Na obrázku 100 (Obr. 100) níže je zobrazeno detailní schéma vysílací části jednotky OLT.



Obr. 100: Vysílací část jednotky EAST 1110

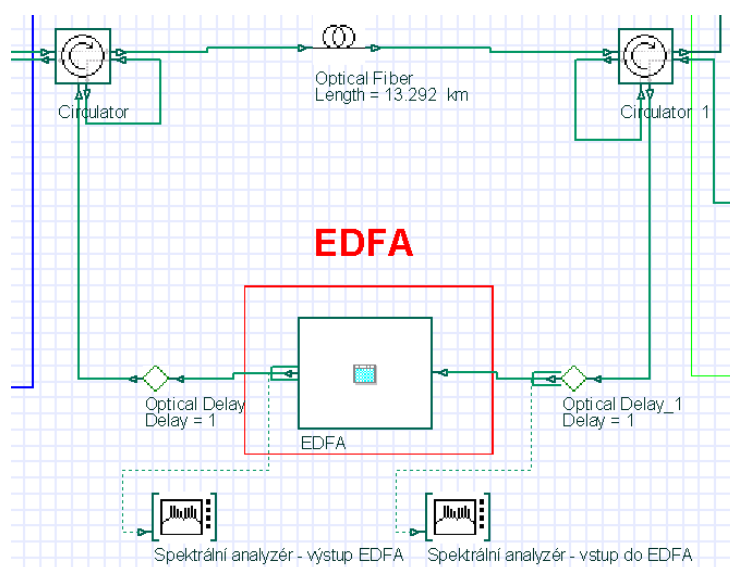
Vysílací část se dá rozdělit do dvou bloků. První blok představuje BLS širokospektrální vysílání, které slouží pro naladění koncových jednotek na dané vlnové délky. Tento blok se na obrázku 100 (Obr. 100) nachází úplně nahoře a je složen ze zdroje bílého světla, z optického filtru a optické útlumového článku pro korekci výstupních hodnot a jejich přiblížení reálným hodnotám.

Druhý blok slouží pro vysílání na jednotlivých kanálech. Jedná se o šest samostatných bloků, kde každá představuje jeden kanál, který byl použit i při reálném měření. K těmto šesti blokům je přiveden zdroj bílého světla přes jednosměrnou AWG odbočnici. Každý blok se pak skládá především z Fabry-Perotova laseru a předřadného filtru. Dále je na Fabry-Perotův laser přiveden zdroj signálu, který je složen z komponent simulující reálný provoz. Jsou to generátor pseudonáhodných dat, poté prvky, kterými se provádí kódování vstupních bitů a také pulsní generátor bez návratu k nule neboli NRZ. Na obrázku 101 (Obr. 101) níže je zobrazeno schéma této části.



Obr. 101: Detail vysílací části jednotky EAST 1110

8.1.2. Přenosová trasa

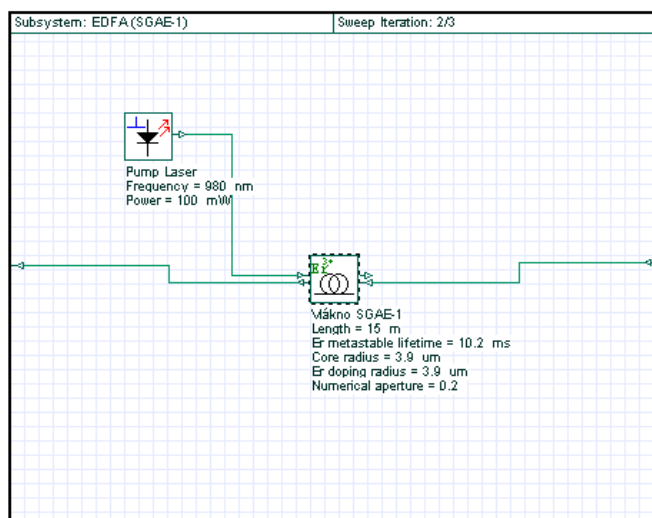


Obr. 102: Přenosová trasa WDM-PON sítě

Přenosová trasa (Obr. 102) se skládá ze dvou cirkulátorů. Dále je v sestupném směru umístěno jednovidové optické vlákno, jehož délka je 13,292 km. Ve vzestupném směru je umístěn zesilovač EDFA, který je blíže popsán v kapitole 8.1.3. Na zesilovač EDFA jsou připojeny dva spektrální analyzéry. Jeden je umístěn před zesilovačem pro změření úrovně výkonu na vstupu do zesilovače a druhý je umístěn za zesilovačem tak, aby bylo možné změřit následné zesílení. Náměry z těchto spektrálních analyzátorů byly poté použity pro vytvoření grafů, které jsou umístěny v kapitole 8.2.

8.1.3. EDFA zesilovač

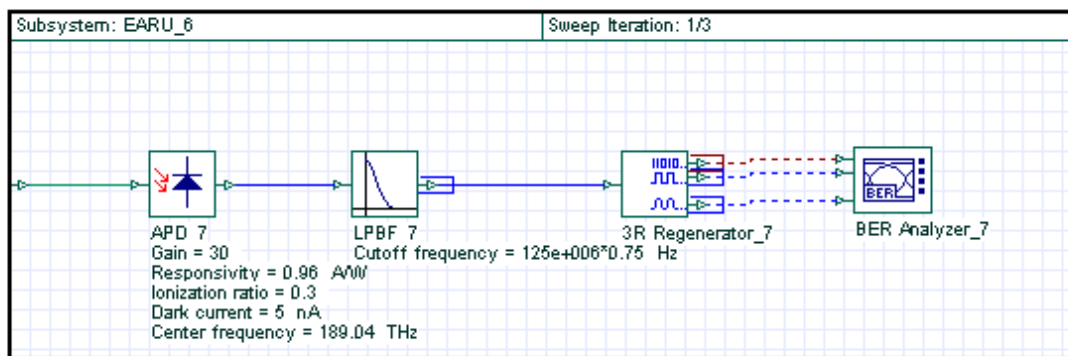
Experimentální EDFA zesilovač se skládá ze dvou komponent. První je pumpovací laser na vlnové délce 980 nm. U tohoto laseru se dále mění pumpovací výkon stejně jako při reálném měření. Druhá komponenta je samotné experimentální Erbiem dopované vlákno. U této komponenty je možné nastavit jednotlivé parametry Erbiem dopovaných vláken a tak bylo možné nastavit jednotlivé parametry u této komponenty přesně podle parametrů k daným experimentálním Erbiem dopovaným vláknům. U této komponenty lze také v záložce „Enhanced“ nastavit, pokud chceme do výsledků simulace započítat vliv teploty na Erbiem dopované vlákno. Toto bylo samozřejmě klíčové pro námi provedené simulace, kde potřebujeme nasimulovat vliv teploty na experimentální Erbiem dopovaná vlákna. Na obrázku 103 (Obr. 103) níže je zobrazeno schéma komponent, ze kterého se skládá EDFA zesilovač v aplikaci Optiwave OptiSystem 14.



Obr. 103: EDFA zesilovač

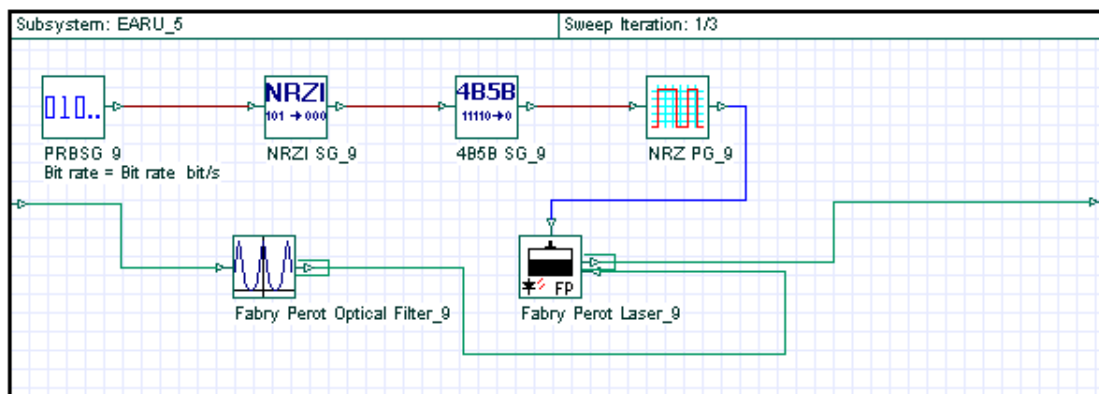
8.1.4. ONU koncové jednotky

Koncové ONU jednotky v této simulaci reprezentují ONU jednotky EARU 1112 použité při reálném měření. ONU jednotka se skládá ze dvou částí. První je přijímací část ONU jednotky. Tato část se skládá z APD fotodiody, dolnoproustného Besselova filtru, 3R regenerátoru a BER analyzáru. Na obrázku 104 (Obr. 104) níže je zobrazena tato přijímací část.



Obr. 104: Přijímací část ONU jednotky EARU 1112

Druhým blokem ONU jednotky je vysílací část. Tato část se skládá z Fabry Perotova laseru a předřadného filtru. Dále je na Fabry-Perotův laser přiveden zdroj signálu a pseudonáhodných dat. Tato část je složena z komponent simulující reálný provoz. Jsou to generátor pseudonáhodných dat, dále prvky, kterými se provádí kódování vstupních bitů a také pulsní generátor bez návratu k nule neboli NRZ. Na obrázku níže je zobrazeno schéma této části.

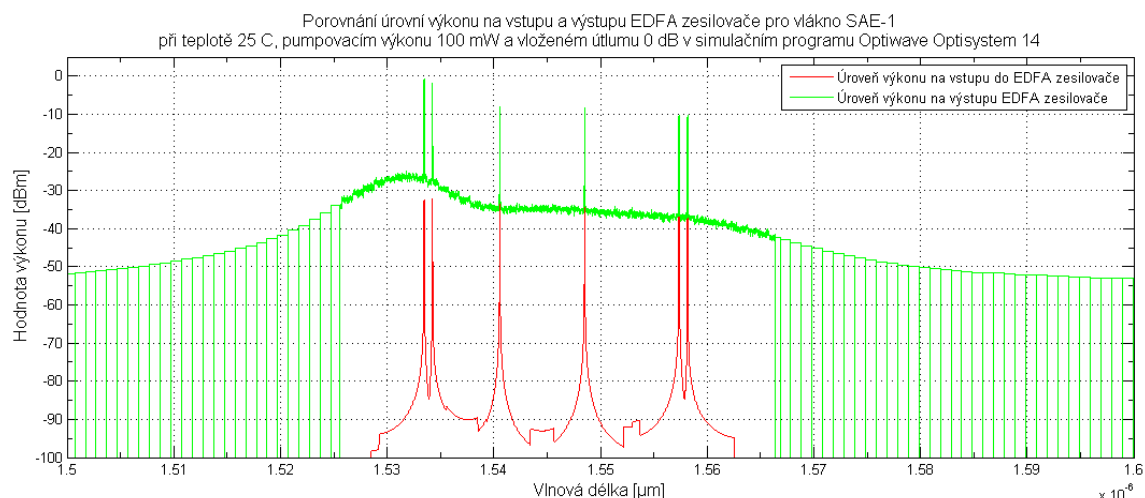


Obr. 105: Vysílací část ONU jednotky EARU 1112

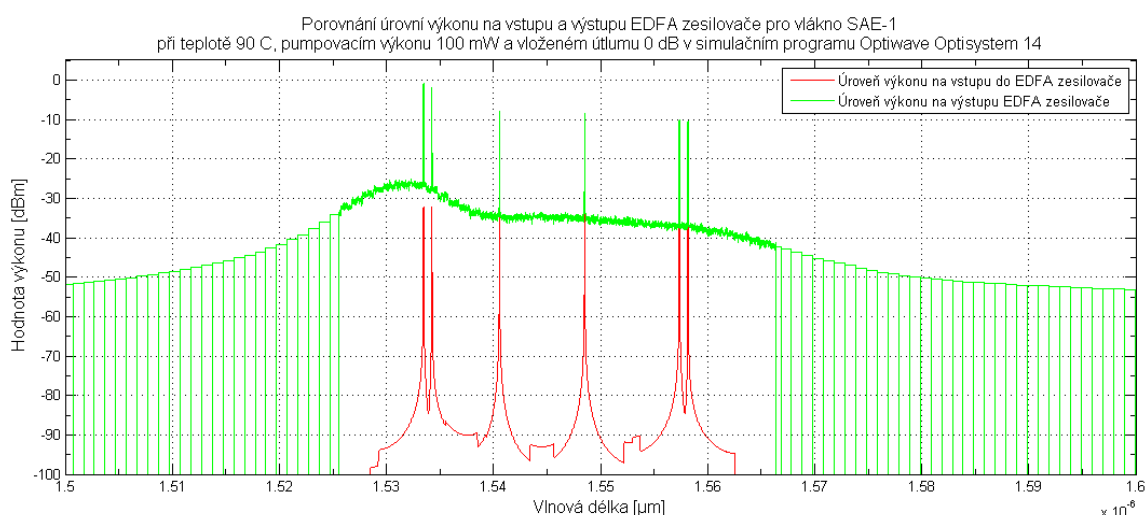
8.2. Testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě v simulaci WDM-PON síť

Následně byly provedeny simulace s jednotlivými experimentálními Erbiem dopovanými vlákny zakomponovanými do simulace. Výsledky ze simulací při teplotách 25°C a 90°C a výkonech pumpy 100 mW a 200 mW jsou zobrazeny níže. Při porovnání výsledků ze simulací s výsledky z reálných měření je nutné vzít na vědomí fakt, že hodnota úrovně signálu je přibližně o 10 dBm vyšší oproti reálným měřením a to proto, že při reálném měření byl spektrometr připojen na rozbočovač 90:10. Tudiž na vstupu do spektrometru byla hodnota úrovně signálu pouze 10%. Při simulacích v programu Optiwave OptiSystem 14 byla na vstupu do spektrálního analyzáru hodnota úrovně signálu 100%.

8.2.1. Simulace s experimentálním vláknem SAE-1



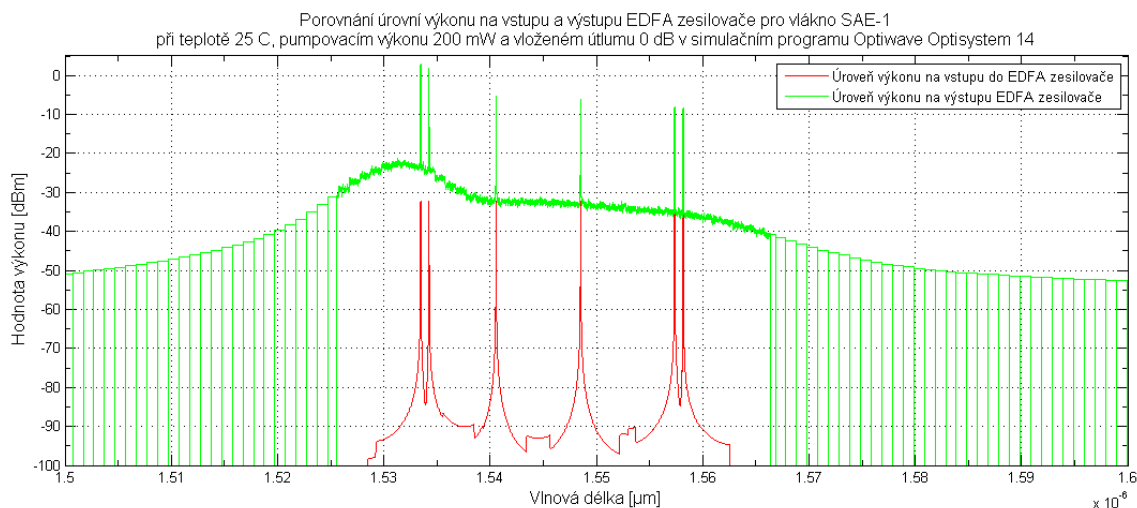
Obr. 106: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14



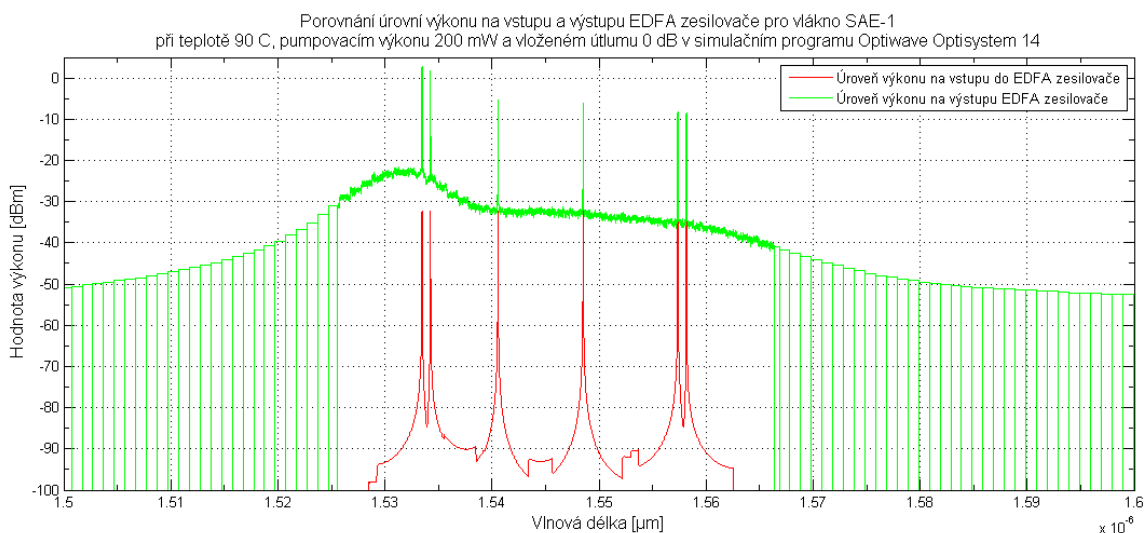
Obr. 107: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25°C a 90°C s výkonem pumpy 100 mW pro Erbiem dopované vlákno SAE-1, které jsou zobrazeny na obrázcích 106 a 107 (Obr. 106 a Obr. 107) je možné pozorovat, že teplota 90°C ovlivnila výsledky simulací jen minimálně. Jedná se o pokles 0,5 až 1 dBm. Celková křivka zesílení se vlivem teploty skoro nezměnila. Hodnota zesílení byla pro první a druhý kanál přibližně 30 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala kolem 20 dBm.

Pokud porovnáme výsledky simulací s výsledky měření v reálné topologii, je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON, která byla sestavena v laboratoři EB316. Jak již bylo zmíněno výše, výsledky ze simulací je nutné brát pouze jako informativní a sloužící pro porovnání s reálnými náměry.



Obr. 108: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

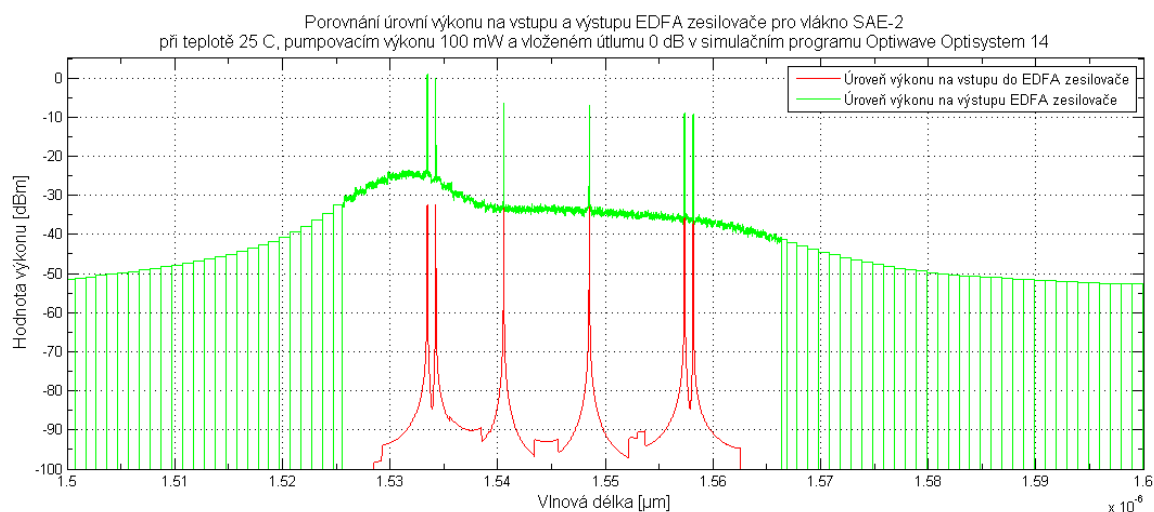


Obr. 109: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

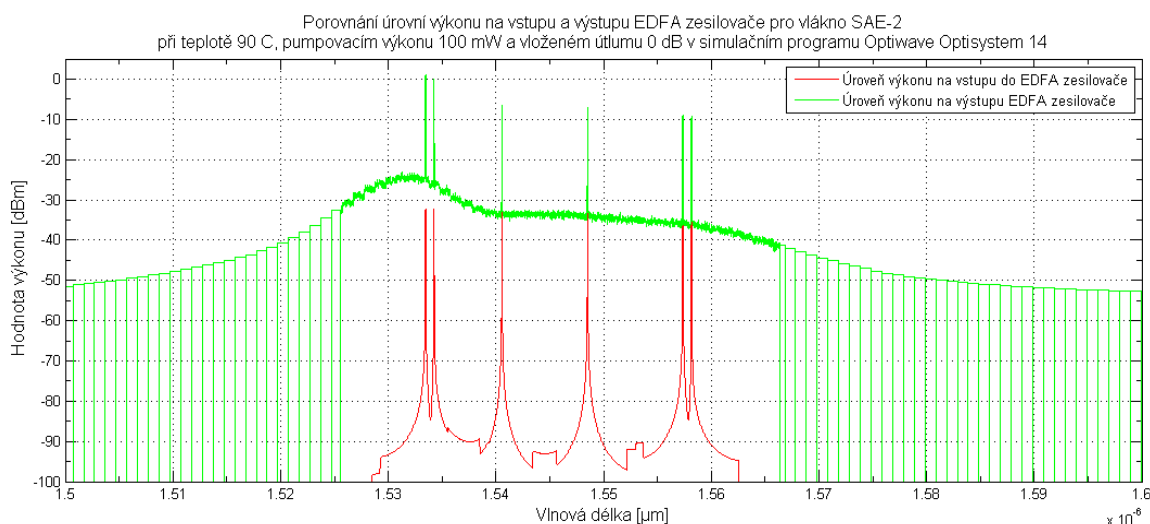
Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25°C a 90°C s výkonem pumpy 200 mW pro Erbiem dopované vlákno SAE-1, které jsou zobrazeny na obrázcích 108 a 109 (Obr. 108 a Obr. 109) je možné pozorovat, že teplota 90°C opět ovlivnila výsledky simulací jen minimálně. Jedná se o stejný pokles jako v předchozím případě a to o 0,5 až 1 dBm. Celková křivka zesílení se vlivem teploty skoro nezměnila. Hodnota zesílení při výkonu pumpy 200 mW byla pro první a druhý kanál přibližně 35 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala kolem 20 až 25 dBm.

Při porovnání výsledků simulací při výkonu pumpy 100 mW a 200 mW je znatelný nárůst zesílení o 3 až 6 dBm. Pokud však porovnáme výsledky simulací s výsledky měření v reálné topologii je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON, která byla sestavena v laboratoři EB316.

8.2.2. Simulace s experimentálním vláknem SAE-2



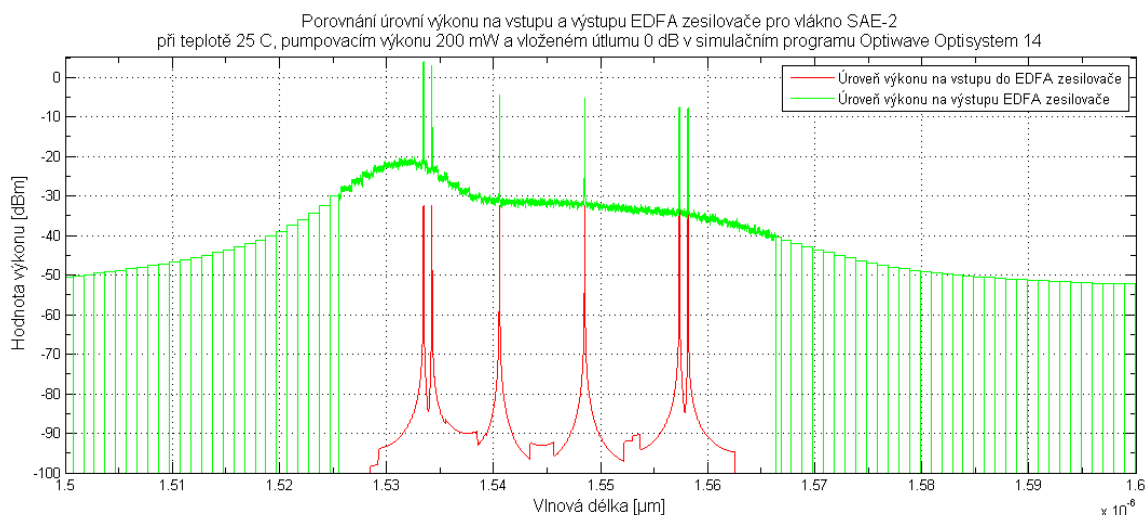
Obr. 110: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25 °C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14



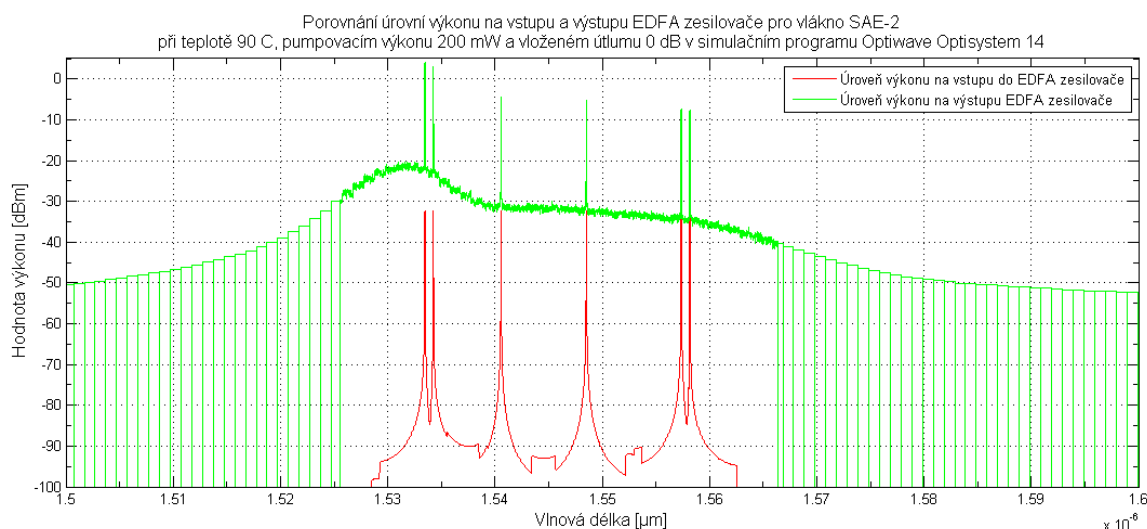
Obr. 111: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 90 °C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25 °C a 90 °C s výkonem pumpy 100 mW pro Erbiem dopované vlákno SAE-2, které jsou zobrazeny na obrázcích 110 a 111 (Obr. 110 a Obr. 111) lze vidět, že teplota 90 °C opět ovlivnila výsledky simulací jen minimálně. Jedná se o stejný pokles jako v předchozích případech a to o 0,5 až 1 dBm. Celková křivka zesílení se vlivem teploty skoro nezměnila. Tato křivka zesílení byla velmi odlišná z důvodu vloženého útlumu tohoto vlákna. Hodnota zesílení při výkonu pumpy 100 mW byla pro první a druhý kanál přibližně 32 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala přibližně 25 dBm.

Pokud však porovnáme výsledky simulací s výsledky měření v reálné topologii je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON, která byla sestavena v laboratoři EB316. Hlavně co se týče celkové křivky zesílení pro toto vlákno SAE-2.



Obr. 112: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

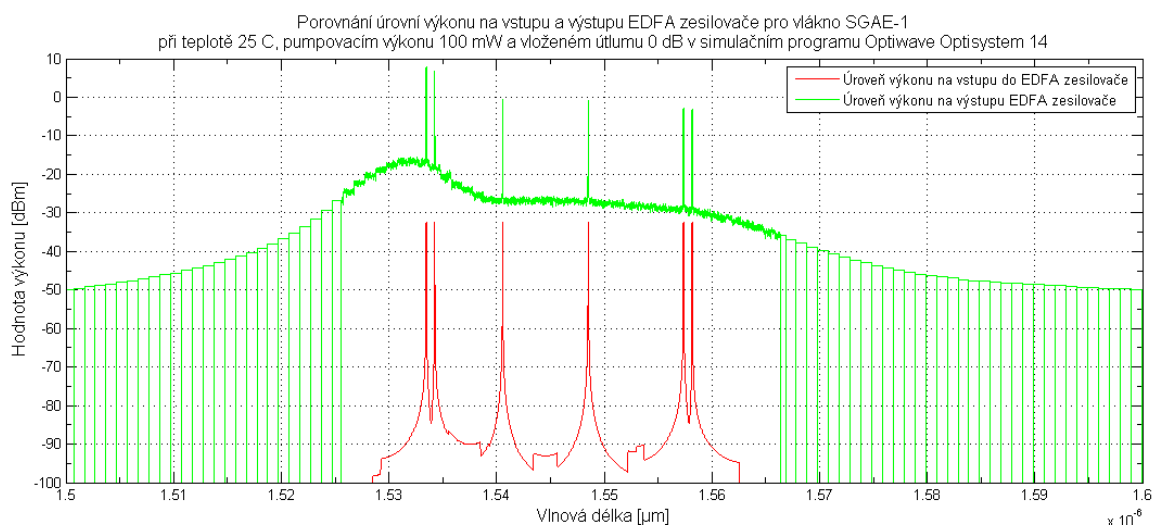


Obr. 113: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

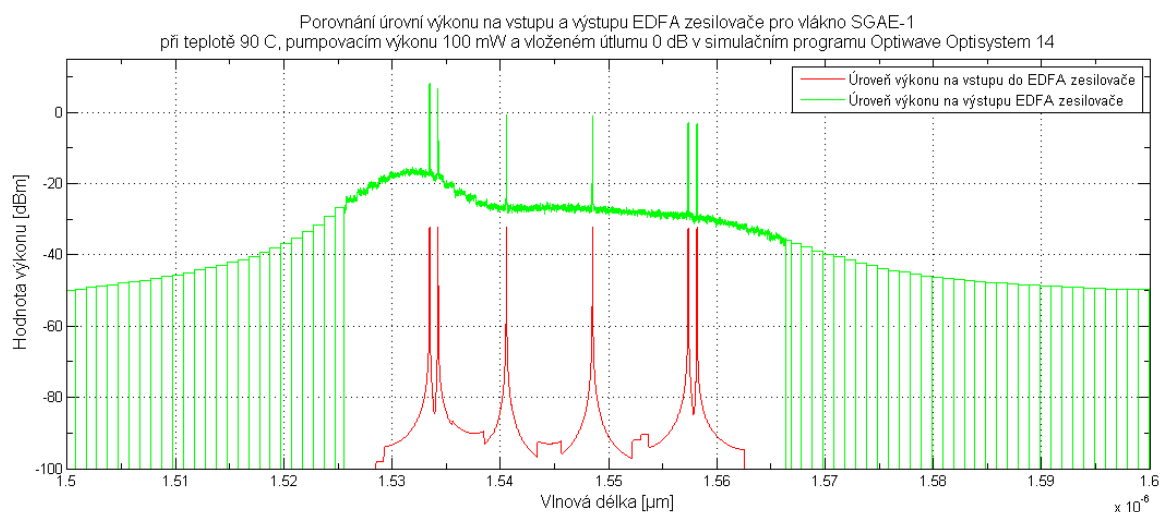
Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25°C a 90°C s výkonem pumpy 200 mW pro Erbiem dopované vlákno SAE-2, které jsou zobrazeny na obrázcích 112 a 113 (Obr. 112 a Obr. 113) je možné si povšimnout, že teplota 90°C opět ovlivnila výsledky simulací jen minimálně. Jedná se o stejný pokles jako v předchozím případě a to o 0,5 až 1 dBm. Celková křivka zesílení zůstala i pod vlivem teploty 90°C skoro nezměněna. Hodnota zesílení při výkonu pumpy 200 mW byla pro první a druhý kanál přibližně 35 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala kolem 20 až 25 dBm.

Při porovnání výsledků simulací při výkonu pumpy 100 mW a 200 mW pro vlákno SAE-2 je znatelný nárůst zesílení o 3 až 4 dBm. Pokud však porovnáme výsledky simulací s výsledky měření v reálné topologii je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON, která byla sestavena v laboratoři EB316. Hodnota zesílení byla u tohoto vlákna zcela odlišná a i křivka zesílení byla pro první dva kanály zcela utlumena.

8.2.3. Simulace s experimentálním vláknem SGAE-1



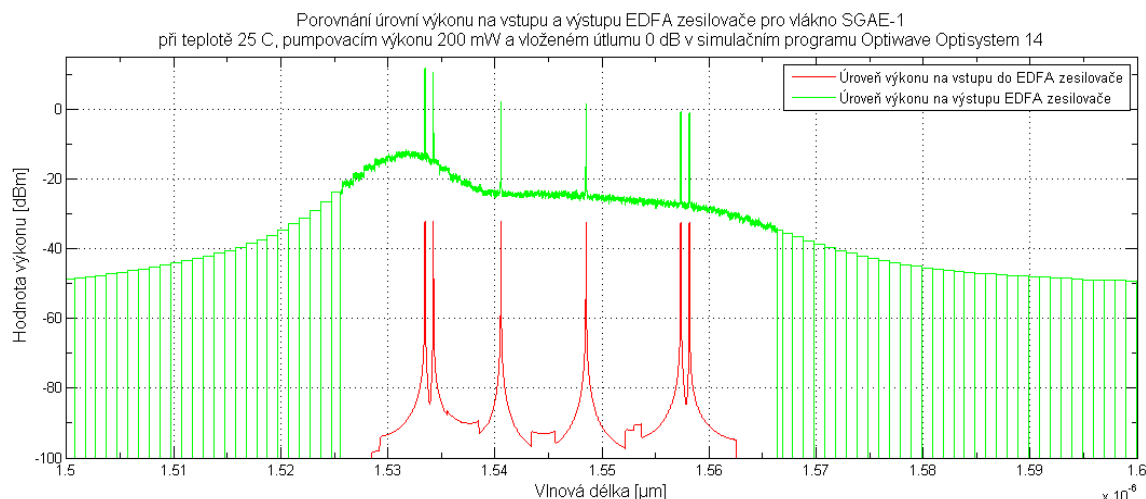
Obr. 114: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14



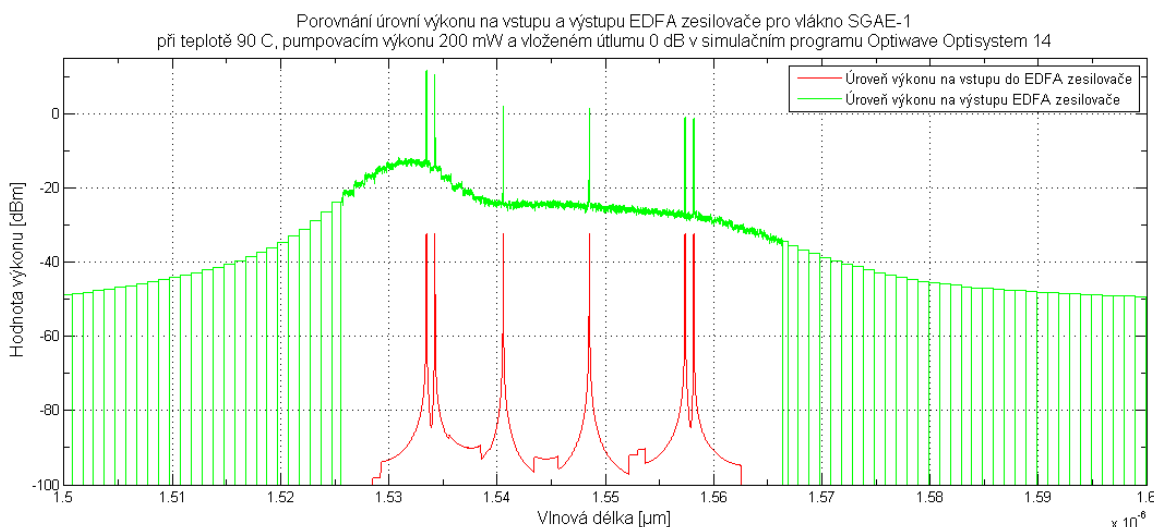
Obr. 115: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25°C a 90°C s výkonem pumpy 100 mW pro Erbiem dopované vlákno SGAE-1, které jsou zobrazeny na obrázcích 114 a 115 (Obr. 114 a Obr. 115) lze vidět, že teplota 90°C ovlivnila výsledky simulací jen minimálně. Jedná se o stejný pokles jako v předchozích případech a to o 0,5 až 1 dBm. U prvních dvou kanálů je však změna 2-3 dBm. Celková křivka zesílení se vlivem teploty jen mírně poklesla a to o 0,5 dBm. Hodnota zesílení při výkonu pumpy 100 mW byla pro první a druhý kanál skoro 40 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala přibližně 32 dBm.

Při porovnání výsledků simulací s výsledky měření v reálné topologii WDM-PON je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON, která byla sestavena v laboratoři EB316. Hodnota zesílení byla při reálném měření o přibližně 10 dBm nižší než při simulacích v programu Optiwave OptiSystem 14.



Obr. 116: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

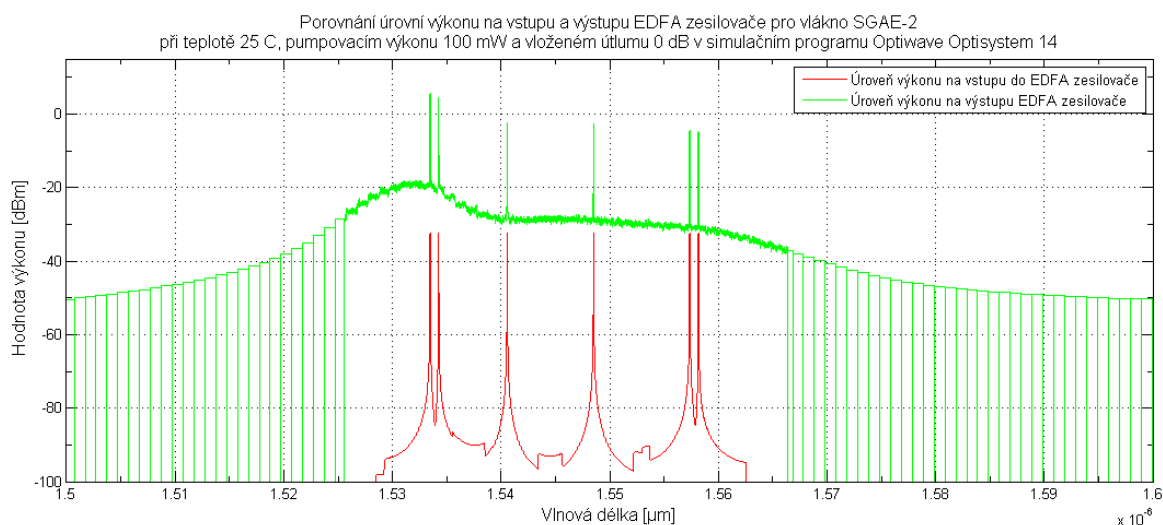


Obr. 117: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

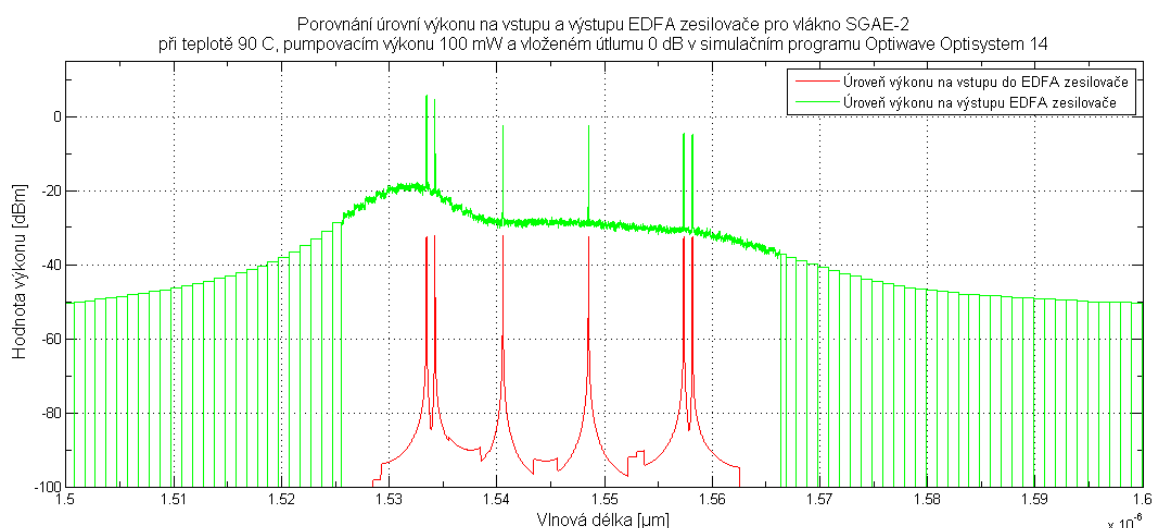
Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25°C a 90°C s výkonem pumpy 200 mW pro Erbiem dopované vlákno SGAE-1, které jsou zobrazeny na obrázcích 116 a 117 (Obr. 116 a Obr. 117) je možné si povšimnout, že teplota 90°C neměla na výsledky zesílení velký dopad. Jedná se o stejný pokles jako v předchozím případě a to o 0,5 až 1 dBm. Celková křivka zesílení zůstala i pod vlivem teploty 90°C skoro nezměněna. Hodnota zesílení při výkonu pumpy 200 mW byla pro první a druhý kanál přibližně 40 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala kolem 32 dBm.

Při porovnání výsledků simulací při výkonu pumpy 100 mW a 200 mW pro vlákno SGAE-1 je znatelný nárůst zesílení o 3 až 4 dBm a to především pro první a druhý kanál. U ostatních kanálů se jedná o zesílení o 2-3 dBm. Pokud však porovnáme výsledky simulací s výsledky měření v reálné topologii je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON, která byla sestavena v laboratoři EB316. Hodnota zesílení byla u tohoto vlákna nižší a zároveň měla křivka zesílení jiný tvar než při simulacích v programu Optiwave OptiSystem 14.

8.2.4. Simulace s experimentálním vláknem SGAE-2



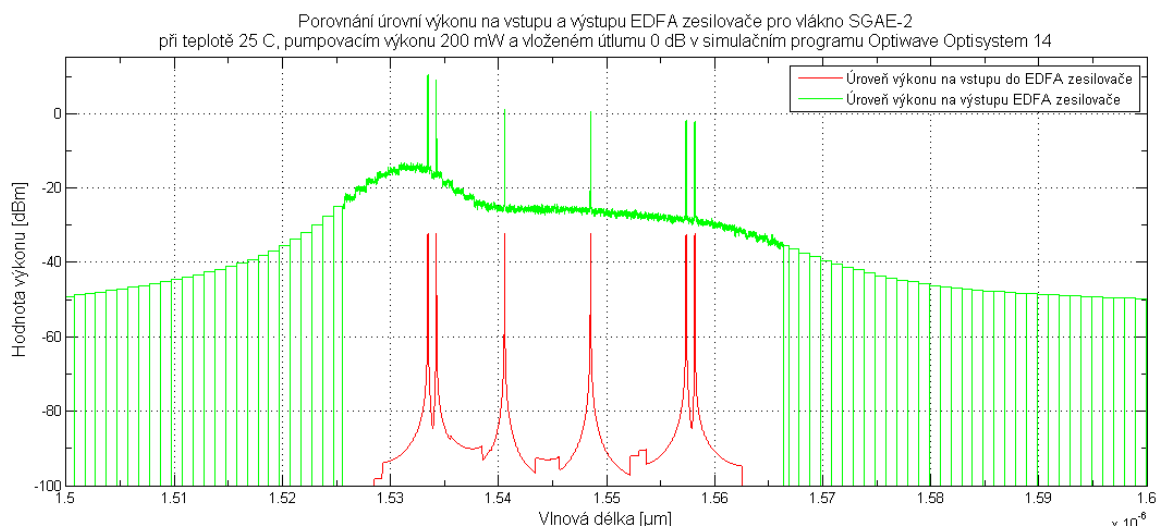
Obr. 118: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14



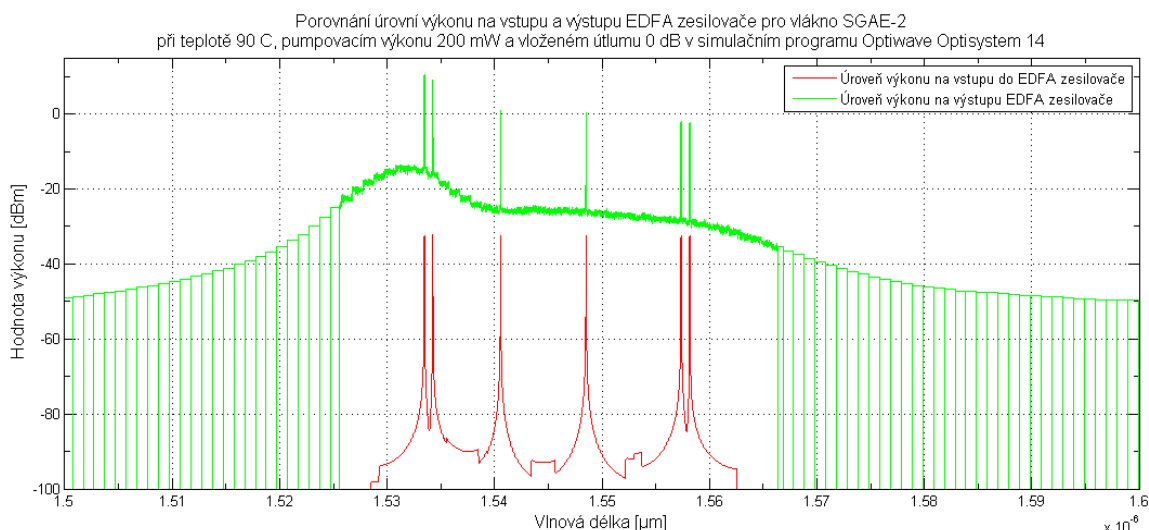
Obr. 119: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25°C a 90°C s výkonem pumpy 100 mW pro Erbiem dopované vlákno SGAE-2, které jsou zobrazeny na obrázcích 118 a 119 (Obr. 118 a Obr. 119) lze rozpoznat, že teplota 90°C opět ovlivnila výsledky simulací jen minimálně. Jedná se o stejný pokles jako v předchozích případech a to o 0,5 až 1 dBm. Celková křivka zesílení vlivem teploty jen mírně poklesla a to o 0,5 dBm. Hodnota zesílení při výkonu pumpy 100 mW byla pro první a druhý kanál skoro 35 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala pod 30 dBm.

Při porovnání výsledků simulací s výsledky měření v reálné topologii WDM-PON je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON.



Obr. 120: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14



Obr. 121: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14

Při porovnání výsledků simulací při teplotách 25°C a 90°C s výkonem pumpy 200 mW pro Erbiem dopované vlákno SGAE-2, které jsou zobrazeny na obrázcích 120 a 121 (Obr. 120 a Obr. 121) je patrné, že teplota 90°C neměla na výsledky zesílení velký vliv. Jedná se o stejný pokles jako v předchozím případě a to o 0,5 až 1 dBm. Celková křivka zesílení zůstala i pod vlivem teploty 90°C skoro nezměněna. Hodnota zesílení při výkonu pumpy 200 mW byla pro první a druhý kanál přibližně 40 dBm. Pro ostatní kanály se hodnota zesílení pohybovala kolem 32 dBm.

Při porovnání výsledků simulací při výkonu pumpy 100 mW a 200 mW pro vlákno SGAE-2 je znatelný nárůst zesílení o 2 až 4 dBm a to především pro první a druhý kanál. U ostatních kanálů se jedná o zesílení o 1-3 dBm. Pokud však porovnáme výsledky simulací s výsledky měření v reálné topologii je jasné, že výsledky ze simulací neodpovídají reálným náměrům v síti WDM-PON, která byla sestavena v laboratoři EB316. Hodnota zesílení byla u tohoto vlákna nižší a zároveň měla křivka zesílení jiný tvar než při simulacích v programu Optiwave OptiSystem 14.

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout a vytvořit experimentální EDFA zesilovač a při jeho vytvoření použít experimentální Erbiem dopovaná vlákna z výzkumného centra pro optická vlákna z Kalkaty v Indii, které poskytlo pro účely této diplomové práce tyto vlákna. Dále bylo nutné otestovat zesilovací schopnosti pro jednotlivá experimentální Erbiem dopovaná vlákna v závislosti na teplotě a výkonu pumpy. Následně bylo nutné tento zesilovač otestovat při nasazení do reálné WDM-PON sítě, která byla sestavena a zapojena v laboratoři EB316, při vystavení různým teplotám a při různých výkonech pumpy.

V první části, která byla zaměřena na teorii, jsou vysvětleny převážně teoretické aspekty fungování optických zesilovačů a jejich typů. V této části byly popsány základní informace o fungování zesilovačů a princip zesílení optického signálu u optických zesilovačů. Také zde byly uvedeny a detailněji popsány různé druhy optických zesilovačů. Dále byly v této části diplomové práce popsány jevy, které negativně ovlivňují přenos signálu, jako například vliv útlumu, nelineárních jevů a také různých šumů na samotný přenos signálu.

V praktické části této diplomové práce bylo nejprve navrženo a posléze sestaveno měřicí pracoviště a poté i samotný experimentální EDFA zesilovač. Při návrhu a následném sestavování měřicího pracoviště byl brán v potaz fakt, že měřicí pracoviště bude sloužit pro testování schopnosti zesílení experimentálního EDFA zesilovače při vystavení různým teplotám. Proto bylo testovací pracoviště navrženo tak, aby bylo použitelné nejen pro účely této diplomové práce, ale aby bylo jednoduše využitelné pro další práce, zabývající se testováním vlivu teploty na optická vlákna. Pro sledování teploty byl využit systém DTS, který poskytuje přesný přehled o teplotě uvnitř měděné kostky.

V další praktické části bylo nutné najít optimální délky experimentálních Erbiem dopovaných vláken. Při tomto hledání optimální délky se většinou používá metoda zkracování vlákna po jednotlivých délkách a postupné proměřování, až se nalezne optimální délka. V této diplomové práci však byla použita zcela odlišná technika. Pro hledání optimální délky byl použit identifikátor síťového provozu FIR-20R, který mohl být pro tyto účely po pár úpravách použit. Díky tomuto inovativnímu postupu bylo možné proměřit zesílení Erbiem dopovaného vlákna bez jeho poškození. Erbiem dopovaná vlákna bylo pak nutné zkrátit pouze jednou tak, abychom získali přesnou optimální délku. Po provedení tohoto postupu byly všechny čtyři experimentální vlákna zkráceny na ideální délky. Následně byly zapojeny do EDFA zesilovače a tím byl experimentální EDFA zesilovač kompletní.

Po zkompletování experimentálního EDFA zesilovače byl proveden jeden z hlavních bodů praktické části. Byly otestovány experimentální Erbiem dopovaná vlákna při jejich vystavení teplotě v rozsahu 25°C až 90°C a při různých výkonech pumpy a to od 0 mW až do 200 mW. Při testování se ukázalo, že při nejvyšší teplotě, tedy 90°C, jsou jednotlivá vlákna tlumena a útlum se pohyboval v rozmezí 1-5 dBm v závislosti na použitém experimentálním Erbiem dopovaném vláknu a také v závislosti na výkonu pumpy. Nejlepších výsledků v této části měření dosahovalo vlákno SGAE-1. Naopak nejhorších výsledků dosahovalo vlákno SAE-2.

Následně bylo provedeno podobné testování experimentálních Erbiem dopovaných vláken, jaké bylo zmíněno v předchozím odstavci s tím rozdílem, že byl experimentální EDFA zesilovač zapojen do sítě WDM-PON v laboratoři EB316. Tuto síť bylo nutné vytvořit pro potřeby této diplomové práce. Byly použity dostupné komponenty, které se nacházeli v laboratoři EB316 a WDM-PON síť byla následně zkompletována a zprovozněna. Poté byl experimentální EDFA zesilovač zapojen ve vzestupném směru do testovací WDM-PON sítě a dále byl otestován vliv teploty 25°C až 90°C. Výsledky z měření byly zpracovány do přehledných grafů a navzájem porovnány. Z těchto porovnání je patrné, že pro nasazení do reálné sítě se nejvíc osvědčilo vlákno SGAE-1. Bylo to nejen z důvodu největší úrovně zesílení, která byla přibližně 30 dBm, ale také dobré odolnosti vůči vysoké teplotě. Naopak jako nejhorší se při porovnání výsledků ukázalo vlákno SAE-2. Toto vlákno signál spíše utlumovalo. Bylo to dáno vlastními parametry samotného vlákna, tak i nízkým výkonem pumpy pro toto vlákno SAE-2.

V poslední části byla v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 14 vytvořena topologie WDM-PON sítě, která byla navržena tak, aby co nejvíc odpovídala navržené reálné WDM-PON síti v laboratoři EB316. Tato topologie zahrnovala také experimentální EDFA zesilovač, který byl umístěn tak jako při reálných měřeních v laboratoři EB316 do vzestupného směru. Nastavení všech hodnot, které je nutné zadat v aplikaci Optiwave OptiSystem 14 tak, aby se topologie co nejvíc shodovala s reálnou topologií, je velice obtížné. Bohužel ne vždy je možné doplnit všechny nezbytné údaje a to především z důvodu, že většina údajů není veřejně dostupná a firmy tyto údaje ani neposkytují. Při simulaci vlivu teploty na Erbiem dopovaná vlákna nelze v této aplikaci zahrnout úplně všechny parametry, které se v reálu promítají do finálních výsledků úrovně zesílení. Proto je nutné brát výsledky ze simulací v programu Optiwave OptiSystem 14 jako informativní a používat je spíše jako zajímavé porovnání k reálným měřením. Při porovnání provedených simulací s reálnými měřeními bylo patrné, že křivky zesílení neodpovídají jednotlivým náměrům při reálném testování. V přibližné úrovni hodnoty zesílení je shoda větší. I tak je nutné, jak již bylo zmíněno, brát výsledky z těchto simulací jen jako informativní.

Tato diplomová práce může být dále využita jako vhodný podklad pro potřeby dalšího studia vlivu teploty na Erbiem dopovaná vlákna a na výsledné zesílení.

Námi navržené měřicí pracoviště může sloužit pro další studenty a pro zpracování jejich bakalářských a diplomových prací zaměřujících se na testování vlivu teploty na optická vlákna. Po provedení nezbytných úprav může být použito také pro měření vlivu minusových teplot na optická vlákna.

Metoda hledání optimální délky Erbiem dopovaných vláken, která byla použita v rámci vypracování této diplomové práce, může být dále testována a používána při hledání optimální délky zesilovacího vlákna namísto destruktivní metody postupného zkracování. Tato metoda je nevýhodná hlavně z ekonomického hlediska vzhledem k ceně Erbiem dopovaného vlákna.

Námi zpracované výsledky a náměry byly poslány do výzkumného centra pro optická vlákna v Kalkatě v Indii. Tam budou výsledky z měření použity v rámci dalšího vývoje experimentálních Erbiem dopovaných vláken v tomto výzkumném centru.

Do budoucna plánuji navázat na tato měření a dále je rozvíjet a také zlepšovat samotné měřicí pracoviště. Také bych rád otestoval vliv záporných teplot na daná experimentální Erbiem dopovaná vlákna. Další možností v testování těchto experimentálních Erbiem dopovaných vláken je použití vyšších výkonu pumpy než jen 200 mW a následné zkoumání úrovně zesílení.

Seznam použité literatury:

- [1] KEISER, Gerd. *Optical fiber communications*. 3rd ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2000, 602 p. ISBN 0-07-100785-7.
- [2] RAMASWAMI, Rajiv; N SIVARAJAN, Kumar; H SASAKI, Galen. *Optical networks: a practical perspective*. 3rd ed. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2009, 893 p. Morgan Kaufmann series in networking. ISBN 978-0-12-374092-2.
- [3] MLEJNEK Z. Optické zesilovače. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2008. Počet stran 45. Vedoucí bakalářské práce doc.Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [4] BOHÁČ, Leoš. *Optické zesilovače v telekomunikační technice* [online]. 2009. 31 p. Přednáška. České vysoké učení technické v Praze. Available from WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4977>>.
- [5] MIROSLAV, Filka. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. první. Brno : Centa, spol. s r. o., 2009. 371 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [6] DIGONNET, Michel J. *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 2001, xii, 777 p. Optical Engineering (Marcel Dekker, Inc.), v. 71. ISBN 08-247-0458-4.
- [7] BECKER, P; OLSSON, N and SIMPSON, J. *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology*. San Diego: Academic Press, c1999, xv, 460 p. ISBN 01-208-4590-3.
- [8] “EDFA Pump Schemes.” In: *Fiber Optic Consulting* [online]. 2011 [cit. 2014-04-15]. Available from: <http://www.fiberoptic-networks.com/2011/12/edfa-pump-schemes/>
- [9] KEISER, Gerd. *Optical Communications Essentials*. McGraw-Hill Companies, July 03,2003. ISBN 0071737995.
- [10] Pump Absorption”. In: *RP Photonics encyclopedia* [online]. 2014-04-15 [cit. 2014-04-15]. Available from: http://www.rp-photonics.com/pump_absorption.html
- [11] HEWAK, Dan. Properties, processing and applications of glass and rare earth-doped glasses for optical fibres. London: INSPEC, 1998. ISBN 08-529-6952-X.
- [12] DIGONNET, Michel J. *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 2001, 777 p. Optical Engineering (Marcel Dekker, Inc.), v. 71. ISBN 08-247-0458-4.
- [13] “Rare-earth-doped gain media”. In: *RP Photonics encyclopedia* [online]. 2014-04-15 [cit. 2014-04-15]. Available from: http://www.rp-photonics.com/rare_earth_doped_gain_media.html
- [14] POBOŘIL, Radek. *Simulace flexibilní optické přístupové sítě* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/87433/POB031_FEI_B2647_2612R059_2011.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jan Látal.

- [15] DEJNEKA, Matthew. PNAS. *Rare earth-doped glass microbarcodes* [online]. 2003 [cit. 2014-04-15]. Available from: <http://www.pnas.org/content/100/2/389/F1.expansion.html>
- [16] HEADLEY Clifford; Govind P. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. San Diego: Elsevier, 2005. ISBN 01-204-4506-9.
- [17] ČECH, M. *Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Tejkal.
- [18] CONNELLY, M. *Semiconductor Optical Amplifiers*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004. 169s. ISBN 0-7923-7657-9.
- [19] POTTER, B. G. *Attenuation in Optical Fibers*. 16 p. Available from WWW: <<http://opti500.cian-erc.org/opti500/pdf/sm/Module3%20Optical%20Attenuation.pdf>>.
- [20] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rd ed. New York: John Wiley, 546 p. ISBN 04-712-1571-6.
- [21] KYSELÁK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy* [online]. Brno, 2008 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10290. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Miloslav Filka.
- [22] BORN, Max; WOLF, Emil. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7th exp. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, xxxiii, 952 p. ISBN 05-216-4222-1.
- [23] LÁTAL, Jan; KOUDELKA, Petr. *Měření v PON*. VSB-TUO: 2011, 90 p.
- [24] MONTERO, Carlos Bock. Upgrade paths from existing copper-based access solutions to advanced agile wavelength-routed passive optical networks. Barcelona, 2006. 159 s. Rigorózní práce. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [25] LÁTAL, Jan; KOUDELKA, Petr; HANÁČEK, František. “Využití distribuovaných optovláknových systémů při detekci průvanů v jeskynních systémech”. In: *Electrorevue* [online]. 2010, Vol. 5, p. 7 [cit. 2013-04-22]. ISSN 1213–1539.
- [26] DIPPEL, Bernd. “Raman scattering intensity”. *Fundamentals, technologies, and applications of Raman spectroscopy* [online]. 2011 [cit. 2013-04-22]. Available from: <<http://www.raman.de/htmlEN/basics/intensityEng.html>>.
- [27] YOSHIDA, Kazuaki; FURUI, Jasuro; SENTSU, Shintaro; KUROHA, Toshiaki. “Loss factors in optical fibres”. In: *Optical and Quantum Electronics*. January 1981, Vol. 13, Issue 1, pp. 85–89. ISSN 0306-8919.
- [28] FIBEROPTICAS FOR SALE CO. What is Four-Wave Mixing (FWM) in Fiber Optic Communication Systems, Nonlinear Effects in High Power, High Bit Rate Fiber Optic Communication Systems [online]. 2011 [cit. 2013-04-22]. Available from: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-four-wave-mixing-fwm-in-fiber-optic-communication-systems/>

- [29] RAMASWAMI, Rajiv; SIVARAJAN, N., Kumar and SASAKI, H., Galen. *Nonlinear photonics: nonlinearities in optics, optoelectronics and fiber communications*. 3rd ed. Berlin: Springer, 2002, 416 p. Morgan Kaufmann series in networking. ISBN 35-404-3123-3. LAUDE,
- [30] MALOMED, A., Boris. *SixtySec: Kerr Effect*. In: [online]. [cit. 2013-04-22]. Available from: www.exploregate.com
- [31] "Kerr effect". In: *RP Photonics encyclopedia* [online]. 2013, 2013-03-22 [cit. 2013-04-22]. Available from: http://www.rp-photonics.com/kerr_effect.html
- [32] "Noise in photodetectors". In: *Optical technologies* [online]. 7.10.2008 [cit. 2013-04-22]. Available from: <http://optical-technologies.info/noise-in-photodetectors/>
- [33] KASAP, S. *Optoelectronics and photonics: principles and practices*. 3rd Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001, xi, 340 p. ISBN 02-016-1087-6.
- [34] "Amplified Spontaneous Emission". In: *RP Photonics encyclopedia* [online]. 2013-04-10 [cit. 2013-04-22]. Available from: http://www.rp-photonics.com/amplified_spontaneous_emission.html
- [35] HALMAZŇA, J., LÁTAL, P. KOUDELKA, F. HANÁČEK a P. ŠIŠKA. Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty - 1. díl. *Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty - 1. díl* [online]. 2010, č. 1 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?1700&uvod_do_distribuvanych_optovlaknovych_systemu_zalozenych_na_ramanove_jevu_pro_mereni_teploty_-_1._dil
- [36] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [pdf]. 2006. vyd. 2006, 172 s. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [37] [37] Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty. *Access.feld.cvut.cz* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra telekomunikační techniky, 2010, 04. 03. 2010 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2010030001>

Seznam zkratek

APD	(Avalanche Photodiode)
ASE	(Amplified Spontaneous Emission)
AWG	(Arrayed Waveguide Grating)
BER	Bit Error Rate
BLS	Broadband Laser Source
CPM	Cross-Phase Modulation
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex
dB	Decibel
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DFB	Distributed Feedback Laser
DSF	Dispersion Shifted Fiber
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EARU	Ethernet Access Residential Unit
EAST	Ethernet Access Service Terminal
EDF	Erbium Doped Fiber
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
ESA	Excited-State Absorption
FWM	Four-Wave Mixing
GHz	Giga Hertz
GS-EDFA	Gain Shifted Erbium-Doped Fiber Amplifier
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
L-band	Long-Band
O-band	Original-Band
OLT	Optical Line Termination
ONU	Optical Network Unit
PDFA	Praseodymium Fiber Amplifiers
PMD	Polarization Mode Dispersion
PON	Passive Optical Network
Rx	Receiver
S-band	Short-Band

SMF	Single-Mode Optical Fiber
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPM	Self-Phase Modulation
TDFA	Thulium-Doped Amplifier
TDM	Time Division Multiplex
Tx	Transmitter
WDM	Wavelength Division Multiplex
WPF	Wavelength Division Multiplex
XPM	Cross-Phase Modulation
YDFA	Ytterbium Fiber Amplifiers

Seznam obrázků

Obr. 1:	Znázornění principu stimulované emise [2]	12
Obr. 2:	Znázornění principu spontánní emise [2]	13
Obr. 3:	Umístění zesilovačů v optické trase	15
Obr. 4:	Princip rekonstrukce signálu 1R [4]	15
Obr. 5:	Princip rekonstrukce signálu 2R [4]	16
Obr. 6:	Princip rekonstrukce signálu 3R [4]	16
Obr. 7:	Principiální schéma znázorňující fungování EDFA optického zesilovače [6]	18
Obr. 8:	Pumpování na vlnové délce 980 nm	20
Obr. 9:	Pumpování na vlnové délce 1480 nm	21
Obr. 10:	Typy pumpovacích obvodů[9]	21
Obr. 11:	Možnosti vzdáleného pumpování [7]	22
Obr. 12:	Schéma energetických úrovní pro Er^{3+} [11]	24
Obr. 13:	Refrakční index nejčastěji používaných dopantů pro sklo[11]	25
Obr. 14:	Typy zesilovačů [14]	26
Obr. 15:	Optimální délka vlákna pro zisk na vlnové délce 1530 nm s pumpou na 980 nm [7] .	27
Obr. 16:	a) Spojovač se spojenými vlákny b) spojovač s miniaturizovaným filtrem[15]	28
Obr. 17:	Dopředné a zpětné zapojení izolátoru[15]	29
Obr. 18:	Schéma optické sítě založené na použití Ramanovských zesilovačů[16]	30
Obr. 19:	Princip zesilování v Ramanovských zesilovačích[16]	31
Obr. 20:	Přenosová okna v optických sítích[20]	33
Obr. 21:	Vztah mezi útlumem způsobeným ohyby a vlnovou délkou[21]	35
Obr. 22:	Znázornění principu polarizačně vidové disperze[23]	38
Obr. 23:	Výsledek stimulované Ramanovy emise [2]	39
Obr. 24:	Princip Ramanova zesílení[25]	40
Obr. 25:	Porovnání Ramanova rozptylu, Rayleova rozptylu [26]	41
Obr. 26:	A) Vytváření a B) absorbování fononu a fotonu[27]	42
Obr. 27:	Ramanovo spektrum rozptýleného záření[35]	43
Obr. 28:	a) Další frekvence generované prostřednictvím FWM částečně degenerované b) Příklad bez degenerovaných frekvencí [28]	44
Obr. 29:	Spektrum dopředného a zpětného ASE s použitým ytterbium dopovaným zesilovacím vláknem [34]	47

Obr. 30:	Spektrum zpětného ASE šumu při různých výkonových úrovních pumpy[34]	47
Obr. 31:	Technický výkres měděné kostky použité pro měření	48
Obr. 32:	Uchycení měděné kostky a systému chlazení (pohled z boku)	50
Obr. 33:	Uchycení měděné kostky a systému chlazení (pohled shora)	50
Obr. 34:	Měření a ověření teplotní izolace pomocí termovizní kamery FLIR TG165	51
Obr. 35:	DTS systém Sentinel DTS-LR	52
Obr. 36:	Pumpovací laser a jeho uchycení v adaptéru Thorlabs LM14S2	54
Obr. 37:	Umístění spojovače s integrovaným izolátorem v rámci zapojení EDFA zesilovače ..	55
Obr. 38:	Schéma kompletního zapojení navrženého EDFA zesilovače	57
Obr. 39:	Kompletní zapojení měřicího pracoviště (pohled zepředu)	57
Obr. 40:	Identifikátor provozu v optických vláknech s měřičem výkonu od firmy FUJIKURA s označením FID-20R	58
Obr. 41:	Schéma zapojení při hledání optimální délky erbiem dopovaného vlákna vzhledem k maximálnímu zesílení	59
Obr. 42:	Měření zesílení u vlákna SAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW	60
Obr. 43:	Měření zesílení u vlákna SAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 10. metru).....	60
Obr. 44:	Měření zesílení u vlákna SAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW	62
Obr. 45:	Měření zesílení u vlákna SAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 10. metru).....	63
Obr. 46:	Měření zesílení u vlákna SGAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW .	64
Obr. 47:	Měření zesílení u vlákna SGAE-1 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 15. metru).....	65
Obr. 48:	Měření zesílení u vlákna SGAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 100 mW .	66
Obr. 49:	Měření zesílení u vlákna SGAE-2 pro jednotlivé délky při výkonu pumpy 200 mW (max. zesílení na 14. metru).....	67
Obr. 50:	Schéma zapojení při měření a testování schopnosti zesílení u experimentálních erbiem dopovaných vláken vzhledem k teplotě	68
Obr. 51:	Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 25°C	69
Obr. 52:	Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 90°C	69
Obr. 53:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB	71
Obr. 54:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB	73
Obr. 55:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB	74

Obr. 56:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB	75
Obr. 57:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB	77
Obr. 58:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB	78
Obr. 59:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	79
Obr. 60:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB.....	80
Obr. 61:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB.....	81
Obr. 62:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	82
Obr. 63:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 3 dB.....	83
Obr. 64:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C a 90°C , pumpovacím výkonu 100 a 200 mW a vloženém útlumu 6 dB.....	84
Obr. 65:	Křivka zpětného rozptylu přenosové trasy pro vlnovou délku 1550 nm.....	87
Obr. 66:	Experimentální zapojení testovací WDM-PON sítě se zapojeným EDFA zesilovačem..	88
Obr. 67:	Experimentální zapojení testovací WDM-PON sítě se zapojeným EDFA zesilovačem v laboratoři EB316 (Kompletní zapojení celé sítě).....	89
Obr. 68:	Experimentální zapojení testovací WDM-PON sítě se zapojeným EDFA zesilovačem v laboratoři EB316 (Pohled na navržený experimentální zesilovač EDFA).....	89
Obr. 69:	Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 25°C při zapojení v experimentální síti WDM-PON.....	90
Obr. 70:	Měření teploty uvnitř měděné kostky pomocí systému DTS při teplotě 90°C při zapojení v experimentální síti WDM-PON.....	90
Obr. 71:	Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	92
Obr. 72:	Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	92
Obr. 73:	Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	93
Obr. 74:	Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	93

Obr. 75: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	94
Obr. 76: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	94
Obr. 77: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	96
Obr. 78: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	96
Obr. 79: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	97
Obr. 80: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	97
Obr. 81: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	98
Obr. 82: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	98
Obr. 83: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	100
Obr. 84: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	100
Obr. 85: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	101
Obr. 86: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	101
Obr. 87: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	102
Obr. 88: Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	102
Obr. 89: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	104
Obr. 90: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	104
Obr. 91: Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 100 mW a vložený útlum 0 dB	105

Obr. 92:	Výstup ze spektrometru EXFO pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 90 C pumpovací výkon 200 mW a vložený útlum 0 dB	105
Obr. 93:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	106
Obr. 94:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 zapojeného do WDM-PON sítě při teplotě 25 C a 90 C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	106
Obr. 95:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	108
Obr. 96:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	108
Obr. 97:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	110
Obr. 98:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro všechny testované vlákna při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB.....	110
Obr. 99:	Schéma navržené WDM-PON sítě.....	112
Obr. 100:	Vysílací část jednotky EAST 1110	113
Obr. 101:	Detail vysílací části jednotky EAST 1110	114
Obr. 102:	Přenosová trasa WDM-PON sítě.....	114
Obr. 103:	EDFA zesilovač	115
Obr. 104:	Přijímací část ONU jednotky EARU 1112	115
Obr. 105:	Vysílací část ONU jednotky EARU 1112.....	116
Obr. 106:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	117
Obr. 107:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	117
Obr. 108:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	118
Obr. 109:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	118
Obr. 110:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	119

Obr. 111:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	119
Obr. 112:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	120
Obr. 113:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SAE-2 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	120
Obr. 114:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	121
Obr. 115:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	121
Obr. 116:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	122
Obr. 117:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-1 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	122
Obr. 118:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	123
Obr. 119:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 100 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	123
Obr. 120:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 25°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	124
Obr. 121:	Porovnání úrovní výkonu na vstupu a výstupu EDFA zesilovače pro vlákno SGAE-2 při teplotě 90°C, pumpovacím výkonu 200 mW a vloženém útlumu 0 dB v simulačním programu Optiwave OptiSystem 14	124

Seznam tabulek

Tab. 1:	Porovnání pump na vlnových délkách 980 nm a 1480 nm [9].....	20
Tab. 2:	Ionizační energie Erbia[11].....	23
Tab. 3:	Charakteristika Erbiem dopovaných vláknových laserů[12]	25
Tab. 4:	Parametry pro jiné používané dopanty[13]	26
Tab. 5:	Přehled příměsí, hodnot absorpce a útlumu[20].....	33
Tab. 6:	Hodnoty Kerrovy konstanty pro některé látky[11]	45
Tab. 7:	Parametry použitých Peltierových článků.....	49
Tab. 8:	Parametry DTS systému Sentinel DTS-LR.....	52
Tab. 9:	Parametry použitého pumpovacího laseru Pirelli E2-980.....	53
Tab. 10:	Parametry použitého pumpovacího laseru Oclaro LC96A74P-20R	54
Tab. 11:	Parametry WDM spojovače s integrovaným izolátorem	55
Tab. 12:	Parametry Erbiem dopovaných vláken	56
Tab. 13:	Laditelný zdroj EXFO FLS-5834A.....	68
Tab. 14:	Zvolené kanály koncových jednotek a jejich vlnových délek.....	86

Seznam příloh

[Příloha A]	Manuály k použitým komponentám – umístěny na CD
[Příloha B]	Hledání ideální délky experimentálních vláken- kompletní naměřené hodnoty a grafy – umístěny na CD
[Příloha C]	Kompletní náměry z testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě – umístěny na CD
[Příloha D]	Kompletní náměry z testování zesilovací schopnosti experimentálních Erbiem dopovaných vláken v závislosti na teplotě při zapojení do testovací WDM-PON sítě – umístěny na CD
[Příloha E]	Schémat se zapojením jednotlivých experimentálních Erbiem dopovaných vláken v aplikaci Optiwave OptiSystem 14 – umístěny na CD